

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

2019

Marek Nebyla

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky

Jednopolové poruchy v síti vn a nn
Single phase faults in MV and LV networks

2019

Marek Nebyla

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra elektroenergetiky

Zadání bakalářské práce

Student: **Marek Nebyla**
Studijní program: B2649 Elektrotechnika
Studijní obor: 3907R001 Elektroenergetika
Téma: **Jednopolové poruchy v distribučních sítích.**
Single phase faults in MV and LV networks.

Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

1. Popis kabelových i venkovních sítí nn a vn
2. Teoretický rozbor vzniku jednopolových poruch
3. Možnosti kompenzace zemních kapacitních proudů
4. Možnosti lokalizace místa zemního spojení
5. Příklad výpočtu

Seznam doporučené odborné literatury:

1. Santarius, P.: Elektrické stanice a vedení, Skripta VŠB-TU Ostrava, 1990
2. Hodinka, M.: Přenos a rozvod elektrické energie, SNTL, 1989
3. Trojánek, Z.: Přechodné jevy v elektrizačních soustavách, SNTL 1987
4. Dohnálek, P.: Ochrany pro průmysl a energetiku, SNTL, 1991
5. Toman, P.: Lokalizace místa zemního spojení v sítích VN, Brno, 2002


Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

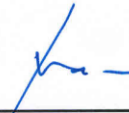
Vedoucí bakalářské práce: **doc. Dr. Ing. Jiří Gurecký**

Datum zadání: 01.09.2018

Datum odevzdání: 30.04.2019



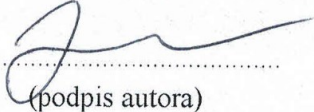

prof. Ing. Stanislav Rusek, CSc.
vedoucí katedry


prof. Ing. Pavel Brandštetter, CSc.
děkan fakulty

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

V Ostravě dne: 30. 4. 2019



(podpis autora)

Poděkování

Děkuji vedoucímu své bakalářské práce doc. Dr. Ing. Jiřímu Gureckému za vedení bakalářské práce a cenné rady a připomínky, které mi poskytnul během vypracovávání této práce.

Abstrakt

V první části bakalářské práce jsou popsány jednotlivé parametry kabelového a venkovního vedení. Tyto parametry jsou dány použitými materiály, průřezem vodičů, volbou konstrukce a umístěním vedení. Druhá část pojednává o jednopólových poruchách, zejména o jejich vzniku a dopadu na provoz elektrizační soustavy. Třetí část práce popisuje možnosti kompenzace a lokalizace zemního spojení. V této části jsou postupně popsány jednotlivé metody jak lokalizace, tak kompenzace a jejich princip, výhody a nevýhody. Poslední část je výpočtová, v této části se zabývá výpočtem poruchového proudu zemního spojení, a rázového zkratového proudu jednofázového zkratu.

Klíčová slova

Zkrat, zemní spojení, lokalizace místa zemního spojení, kompenzace zemních kapacitních proudů.

Abstract

In the first part of the bachelor thesis, the author examines the parameters of cable and outdoor lines. These properties are determined by used materials, diameter of conductors, choice of construction and placement of lines. The second part is about a single phase failures mostly about their formation and impact in operation of electricity network. The third part describes possibilities of compensating and location of the ground fault. In this part are analysed individual methods of location and compensate their principle, advantages and disadvantages. The last part is computational, which deals with the calculation of the earth fault current, the fault current of the single-phase short circuit.

Key words

Shunt fault, earth fault, fault location in compensated network, earth fault current compensation.

Obsah

Obsah	8
Seznam symbolů a zkratk:	10
Seznam obrázků	11
Seznam tabulek.....	12
Úvod	13
1. Popis kabelových i venkovních sítí nn a vn	14
1.1. Elektrické vedení	14
1.2. Elektrické sítě vn a nn	14
1.3. Venkovní vedení	14
1.3.1. Činný odpor vedení.....	15
1.3.2. Indukčnost venkovního vedení.....	16
1.3.3. Kapacita vedení	18
1.4. Vodiče pro venkovní vedení.....	21
1.4.1. Požadavky na vodiče.....	21
1.4.2. Materiály pro vodiče.....	21
1.4.3. Konstrukce vodiče.....	22
1.5. Kabelové vedení	23
2. Teoretický rozbor vzniku jednopólových poruch	25
2.1. Zkrat.....	25
2.2. Zkrat jednofázový:	29
2.3. Zemní spojení	31
3. Možnosti kompenzace zemních kapacitních proudů	33
3.1. Uzemnění uzlu přes zhášecí tlumivku.....	33
3.2. Uzemnění přes rezistor.....	35
3.3. Uzemnění s paralelním připojováním rezistoru k tlumivce	35
3.4. Pomocí řízeného zdroje	36
4. Možnosti lokalizace poruchy	37
4.1. Metody statické vhodné pro izolované distribuční soustavy:.....	37
4.2. Metody statické vhodné pro kompenzované distribuční soustavy:.....	38
4.3. Metody dynamické.....	41

4.4. Lokalizační metody	44
5. Výpočet.....	46
5.1. Výpočet jednofázového zkratu v uzemněné síti	46
5.1.1. Výpočet parametrů.....	46
5.1.2. Jednofázový zkrat bez vlivu asynchronního motoru.....	50
5.1.3. Jednofázový zkrat s vlivem asynchronního motoru.....	52
5.2. Výpočet proudu zemního spojení	54
Závěr.....	55
Literatura	56

Seznam symbolů a zkratk:

Al	chemická značka hliníku
Cu	chemická značka mědi
Fe	chemická značka železa
Mg	chemická značka manganu
PVC	polyvinylchlorid
AM	asynchronní motor
nn	nízké napětí
vn	vysoké napětí
vvn	velmi vysoké napětí

Seznam obrázků

Obrázek 1: Jednofázový model vedení [3]	14
Obrázek 2: Kapacita vedení bez vlivu země [3]	19
Obrázek 3: kapacita vedení s vlivem země [3]	20
Obrázek 4: Časový průběh zkratového proudu [7]	27
Obrázek 5: Jednofázový zkrat [7]	29
Obrázek 6: Složky jednofázového zkratu [7]	30
Obrázek 7: Fázorový diagram proudů [7]	30
Obrázek 8: Fázorový diagram napětí [7]	30
Obrázek 9: Zemní spojení [8]	31
Obrázek 10: Napěťové a proudové poměry při zemním spojení [8]	32
Obrázek 11: Uzemnění přes tlumivku [8]	34
Obrázek 12: Napěťové a proudové poměry při zemním spojení s kompenzací pomocí tlumivky [8]	34
Obrázek 13 : Uzemnění přes rezistor [8]	35
Obrázek 14: Uzemnění s paralelním připojováním rezistoru k tlumivce [8]	36
Obrázek 15: Zapojení řízeného zdroje do sítě [9]	36
Obrázek 16: Příklad charakteristiky wattmetrického článku [6]	39
Obrázek 17: Pracovní charakteristika přírůstkového konduktančního článku [6]	41
Obrázek 18: Oscilografický průběh nepoškozeného vývodu [6]	41
Obrázek 19: Oscilografický průběh poškozeného vývodu [6]	42
Obrázek 20: Znárodnění oblastí A,B a C [10]	43
Obrázek 21: Lokalizace místa zemního spojení pomocí indikátorů poruch [6]	45
Obrázek 22: Schéma sítě, pro řešení zkratu	46
Obrázek 23: Nosný stožár 110 kV, vodiče 3 240 AlFe 6 + 1 185 AlFe 3	47
Obrázek 24: Schéma sousledné složky, pro řešení zkratu bez uvažování vlivu AM	50
Obrázek 25: Schéma netočivé složky	51
Obrázek 26: Schéma sousledné složky pro řešení zkratu s uvažováním vlivu AM	52
Obrázek 27: Schéma sítě, pro řešení zemního spojení	54

Seznam tabulek

Tabulka 1: Teplotní součinitel a rezistivita pro jednotlivé materiály [1]	15
Tabulka 2: Parametry venkovního vedení [4]	21
Tabulka 3: Parametru kabelu 22-AXEKVCEY uložení vedle sebe v zemi [4]	24
Tabulka 4: Parametru kabelu 1-CYKY uloženého v zemi [4].....	24
Tabulka 5: Četnost výskytu jednotlivých zkratů [6]	28
Tabulka 6: Výsledky výpočtů.....	54

Úvod

Elektrizační soustavu tvoří zařízení potřebné pro výrobu a následné dodání elektrické energie od místa výroby až ke konečnému spotřebiteli. Základní prvky jsou elektrárny, které umožní výrobu elektrické energie a rozvodné stanice, které transformují elektrické napětí na určitou hladinu, pro lepší efektivitu přenosu elektrické energie. Elektrizační soustava se dělí na přenosovou a distribuční síť. Přenosová síť je část elektrizační soustavy, která tvoří přenosovou cestu pro napájení velkých stanic a uzlů. V České republice se pro přenosovou soustavu používají napěťové hladiny 400 kV, 220 kV a 110 kV. Distribuční síť je část elektrizační soustavy, která slouží pro dodávku elektrické energie odběratelům. Používané napěťové hladiny jsou 110 kV, 35 kV, 22 kV, 10 kV a 6 kV.

Pro zjednodušení výpočtu vedení používáme matematické model vedení. Ten je reprezentován dvojbranem, v jehož podélné větvi je činný odpor a indukčnost vedení a v příčné větvi nalezneme paralelní spojení vodivosti a kapacity vedení.

Při provozu elektrické sítě mohou nastat přechodové jevy, ty vznikají, když elektrická soustava přechází z jednoho ustáleného stavu do druhého, tyto jevy vznikají při změně zatížení nebo při poruše. Mezi nejčastější poruchy patří zkrat, zemní spojení a přepětí.

1. Popis kabelových i venkovních sítí nn a vn

1.1. Elektrické vedení

Elektrické vedení je součástí elektrizační soustavy. Ta se skládá z vodičů, izolátorů a kotvicích prvků. Elektrické vedení můžeme rozdělit podle napěťové hladiny a podle konstrukce. Podle napěťové hladiny rozdělujeme vedení na nízkonapěťové a vysokonapěťové vedení. Konstrukčně se dělí na vedení venkovní a kabelové. Elektrické vedení navrhujeme nejprve po elektrické stránce, kdy zjišťujeme provozní napětí, úbytky napětí, přenosové ztráty, kompenzaci a jiné, a poté po mechanické stránce. [1]

1.2. Elektrické sítě vn a nn

Sítě nízkého napětí jsou u nás provozovány na napěťové hladině 400 V, zajišťují přenos elektrické energie v obcích ke koncovým zákazníkům. Kabelové provedení těchto sítí se používá ve městech, venkovní provedení spíše na vesnicích s menší hustotou odběrů. Rozvodné systémy nízkého napětí se staví obvykle s jedním systémem přípojníc, a to bez podélného nebo s podélným dělením. [2]

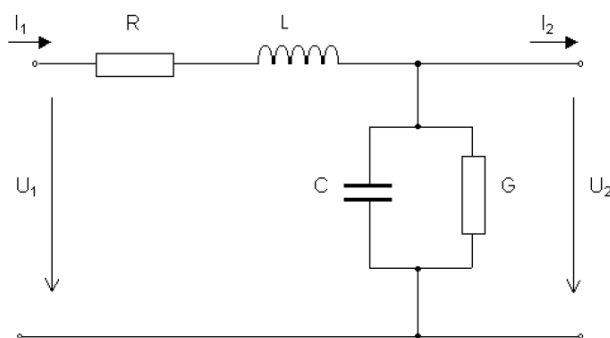
Sítě vysokého napětí jsou u nás provozovány na napěťové hladině 35 kV, 22 kV, 10kV a 6kV. Většina těchto sítí je konstrukčně provedena jako síť venkovní s holým vodičem připevněným na stožáru pomocí izolátorů. [2]

1.3. Venkovní vedení

Základní parametry venkovního vedení jsou rezistence, indukčnost, svod a kapacita. Tyto parametry mohou být vyjádřeny na jednotku délky nebo na délku celého vedení. Pokud pracujeme s parametry danými na jednotku délky, tak i impedance a admitance je vypočtena na jednotku délky. [1]

V obecním případě mají vodiče tyto čtyři parametry:

- $R [\Omega]$ činný odpor
- $L [H]$ indukčnost
- $C [F]$ kapacita
- $G [S]$ svodová vodivost



Obrázek 1: Jednofázový model vedení [3]

Rezistence R a induktivní reaktance X tvoří podélnou impedanci vedení, která je dána vztahem:

$$\bar{Z} = R + j\omega L [\Omega] \quad (1.1)$$

Konduktance G a kapacitní susceptance B tvoří příčnou admitanci, která je dána vztahem:

$$\bar{Y} = G + j\omega C [S] \quad (1.2)$$

1.3.1. Činný odpor vedení

Tato veličina je závislá na materiálu, z kterého je vodič vyroben. Odpor vedení je přímo úměrný délce vedení a měrnému odporu a nepřímo úměrný průřezu vedení dle vztahu:

$$R = \rho \frac{l}{s} [\Omega] \quad (1.3)$$

Kde: l - délka vodiče [m]

ρ - měrný odpor vodiče [$\Omega \cdot \text{mm}^2 \cdot \text{m}$]

s - průřez vodiče [mm^2]

Činný odpor je teplotně závislý, s rostoucí teplotou činný odpor roste. Kvůli tomuto jevu je činný odpor definovaný pro teplotu 20°C , pro výpočet činného odporu vodiče pro jinou teplotu je zapotřebí znát součinitel odporu α . [1]

$$R_v = R_{20}(1 + \alpha\Delta v) [\Omega] \quad (1.4)$$

Kde: ϑ - uvažovaná teplota [$^\circ\text{C}$]

R_{20} - rezistivita při teplotě 20°C [Ω]

α - teplotní součinitel [K^{-1}]

$\Delta\vartheta$ - teplotní rozdíl [$^\circ\text{C}$]

Tabulka 1: Teplotní součinitel a rezistivita pro jednotlivé materiály [1]

MATERIÁL	Cu	Al, AlFe	Fe
α	$3,93 \times 10^{-3}$	4×10^{-3}	$4,5 \times 10^{-3}$
R_{20}	$17,8 \times 10^{-3}$	$28,7 \times 10^{-3}$	200×10^{-3}

Na odpor vedení má také vliv skinefekt. Tento povrchový jev způsobuje nerovnoměrné rozložení střídavého proudu po průřezu vodiče. Při průchodu střídavého proudu materiál vykazuje větší odpor s porovnáním při průchodu proudu stejnosměrného. Pro kmitočty 50 Hz je tento jev nepatrný. [1]

Při použití lan musíme uvažovat zvětšení odporu vedení, které vzniká v důsledku zakroucení vláken lan kolem osy. Činitel zvětšení rezistence (k) je stanoven poměrem dílků závitů šroubovice k její výšce.

$$k = \frac{\sqrt{a_n^2 + (D_n - d)^2 \pi^2}}{a_n} [-] \quad (1.5)$$

Kde: a_n - výška šroubovice [m]

D_n - vnější průměr lana [m]

D - průměr vodiče [m]

Další parametr, který výsledně ovlivňuje odpor vedení ve smyslu prodloužení proudovodné dráhy, oproti délky vedení je průhyb lana.

1.3.2. Indukčnost venkovního vedení

Proudy tekoucí vedením vytváří elektromagnetické pole. Toto pole působí na vodič samotný, i na své okolí. Charakter pole je určen charakterem proudem tekoucím ve vodiči. Indukčnost rozdělujeme na vlastní a vzájemnou. Indukčnost venkovního vedení závisí primárně na napěťové hladině, uspořádání a vzdálenosti mezi lany. [3]

Vlastní indukčnost lze vyjádřit tímto vztahem:

$$L = 0,46 \cdot \log \frac{2l}{r} - 0,15 [mH \cdot km^{-1}] \quad (1.6)$$

Kde: l - délka vodiče [dosadíme v totožných jednotkách jako r]

r - poloměr vodiče [dosadíme v totožných jednotkách jako l]

Vzájemná indukčnost lze vyjádřit tímto vztahem:

$$M = 0,46 \cdot \log \frac{2l}{a} - 0,2 [mH \cdot km^{-1}] \quad (1.7)$$

- a - vzdálenost mezi vodiči [dosadíme v totožných jednotkách jako l]

Indukčnost trojfázového nesymetrického vedení

Uvažujeme-li, že součet proudů je vždy roven nule. V časovém okamžiku, kdy je proud jedné fáze na maximální hodnotě, můžeme určit poměr proudů pomocí vztahu:

$$-i_1 = i_2 + i_3 \rightarrow i_2 = i_3 = -\frac{i_1}{2} \quad (1.8)$$

Elektromagnetické napětí prvního vodiče je rovno:

$$e = -L \frac{di_1}{dt} + \frac{1}{2} M_{12} \frac{di_1}{dt} + \frac{1}{2} M_{13} \frac{di_1}{dt} = -\left(L - \frac{1}{2} M_{12} - \frac{1}{2} M_{13}\right) \frac{di_1}{dt} = -L_{C1} \frac{di_1}{dt} \quad (1.9)$$

Indukčnost prvního vodiče:

$$L_{C1} = L - \frac{1}{2} M_{12} - \frac{1}{2} M_{13} = 0,46 \cdot \log \frac{\sqrt{a_{12} \cdot a_{13}}}{r} + 0,05 \text{ [mH} \cdot \text{km}^{-1}] \quad (1.10)$$

Kde a_{12} vzdálenost mezi vodiči [m]

r poloměr vodiče [m]

Indukčnost druhého a třetího vodiče

$$L_{C2} = 0,46 \cdot \log \frac{\sqrt{a_{12} \cdot a_{23}}}{r} + 0,05 \text{ [mH} \cdot \text{km}^{-1}] \quad (1.11)$$

$$L_{C3} = 0,46 \cdot \log \frac{\sqrt{a_{12} \cdot a_{23}}}{r} + 0,05 \text{ [mH} \cdot \text{km}^{-1}] \quad (1.12)$$

Střední indukčnost vedení

$$L_{Cstř} = \frac{1}{3} (L_{C1} + L_{C2} + L_{C3}) = 0,46 \cdot \log \frac{\sqrt[3]{a_{12} \cdot a_{13} \cdot a_{23}}}{r} + 0,05 \text{ [mH} \cdot \text{km}^{-1}] \quad (1.13)$$

Indukčnost svazkových vodičů

Při výpočtech použití svazkových vodičů stanovíme ekvivalentní poloměr. Tento vodič ekvivalentního poloměru se chová z hlediska elektromagnetického pole stejně jako svazkový vodič. Použití svazkových vodičů přináší výhody v podobě zlepšení mechanických vlastností vedení, snížení indukční reaktance v důsledku snížení indukčnosti a zmenšení ztrát způsobené korunou. [3]

Vztah pro ekvivalentní poloměr:

$$r_e = \sqrt[n]{r \cdot d_{12} \cdot d_{13} \cdot \dots \cdot d_{1n}} [m] \quad (1.14)$$

Kde n počet vodičů ve svazku [-]

d_{1n} vzdálenost mezi vodiči [m]

Následný výpočet indukčnosti dle rovnice:

$$L_{Cstř} = 0,46 \cdot \log \frac{a_s}{r_e} + \frac{0,05}{n} [mH \cdot km^{-1}] \quad (1.15)$$

Kde a_s střední vzdálenost vodiče [m]

$$a_s = \sqrt[3]{a_{12} \cdot a_{13} \cdot a_{23}} [m] \quad (1.16)$$

1.3.3. Kapacita vedení

Elektrické vedení v důsledku existence elektrického pole vykazuje také kapacitu. Odvození kapacity vedení je určeno z teorie elektrostatického pole. [3]

Elementárním vtahem pro odvození kapacity vedení je vyjádření elektrického potenciálu:

$$U = \frac{Q}{2\pi\epsilon} \ln \frac{\rho_0}{\rho} [V] \quad (1.17)$$

Kde Q náboj vodiče [C.m⁻¹]

ϵ permitivita [F.m⁻¹]

ρ vzdálenost od vodiče [m]

ρ_0 vzdálenost od vodiče, ve kterém předpokládáme nulový potenciál [m]

Kapacitu můžeme stanovit:

- bez uvažování vlivu země
- s uvažováním vlivu země

Kapacita vedení bez uvažování vlivu země

Při nesymetrickém vedení, mají vodiče od sebe různou vzdálenost. Uvažujeme časový okamžik, kdy proud jedné fáze je maximální. Pro elektrické náboje v tomto okamžiku platí:

$$Q = Q_1, Q_2 = Q_3 = -\frac{Q}{2} \quad (1.18)$$

Pro elektrické potenciál platí:

$$U_1 = \frac{Q}{2\pi\epsilon} \ln \frac{\rho_0}{r} - \frac{Q}{4\pi\epsilon} \ln \frac{\rho_0}{d_{12}} - \frac{Q}{4\pi\epsilon} \ln \frac{\rho_0}{d_{13}} = \frac{Q}{2\pi\epsilon} \ln \frac{\sqrt{d_{12} \cdot d_{13}}}{r} \quad (1.19)$$

Kapacity jednotlivých vodičů jsou rovny:

$$C_1 = \frac{1}{18 \ln \frac{\sqrt{d_{12} \cdot d_{13}}}{r}} [\mu\text{F} \cdot \text{km}^{-1}] \quad (1.20)$$

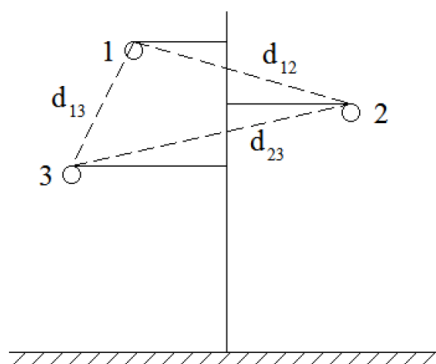
$$C_2 = \frac{1}{18 \ln \frac{\sqrt{d_{12} \cdot d_{23}}}{r}} [\mu\text{F} \cdot \text{km}^{-1}] \quad (1.21)$$

$$C_3 = \frac{1}{18 \ln \frac{\sqrt{d_{13} \cdot d_{23}}}{r}} [\mu\text{F} \cdot \text{km}^{-1}] \quad (1.22)$$

Poté můžeme následně vyjádřit střední kapacitu vedení, která je dána aritmetickým průměrem kapacit jednotlivých vodičů.

$$C_{stř} = \frac{1}{3} (C_1 + C_2 + C_3) = \frac{1}{18 \ln \frac{\sqrt[3]{d_s}}{r}} [\mu\text{F} \cdot \text{km}^{-1}] \quad (1.23)$$

$$d_s = \sqrt[3]{d_{12} \cdot d_{13} \cdot d_{23}} [\text{m}] \quad (1.24)$$



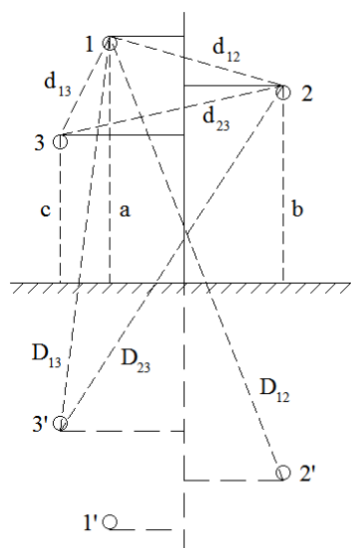
Obrázek 2: Kapacita vedení bez vlivu země [3]

Kapacita s vlivem země

$$C_{stř} = \frac{1}{3} (C_1 + C_2 + C_3) = \frac{1}{18 \ln \frac{d_s \cdot 2m}{r \cdot D_s}} = \frac{0,0242}{18 \ln \frac{d_s \cdot 2m}{r \cdot D_s}} [\mu F \cdot km] \quad (1.25)$$

$$D_s = \sqrt[3]{D_{12} \cdot D_{13} \cdot D_{23}} [m] \quad (1.26)$$

$$m = \sqrt[3]{a \cdot b \cdot c} [m] \quad (1.27)$$



Obrázek 3: kapacita vedení s vlivem země [3]

Transpozice vedení

Při zavěšení lan na stožárech, dochází k nesymetrii parametrů z důvodu rozlišné vzdáleností lan od sebe samých a lan od země, z důvodu nerovnosti krajiny. Pro docílení symetrie vedení se využívá transpozice vedení. Provedení spočívá v záměně pozice vodičů v hlavě stožáru. Reaktance vzdušných vedení se pohybuje obvykle v rozmezí 0,25 až 0,45 Ω/km . Dle normy ČSN 31 100 je dobré použít zákrut vedení u kterých napětíová hladina přesahuje 10 kV a jsou delší více jak 30 km. Používá se metoda dvojnásobného zakroucení a trojnásobného. U dvojnásobného zakroucení není pořadí fází na začátku a konci vedení stejné. Pokud chceme pořadí ponechat, musíme využít trojnásobný zákrut. [1]

Tabulka 2: Parametry venkovního vedení [4]

Parametry venkovních vedení 110 kV						
Provedení	Vodiče AlFe [mm ²]	Stožáry	R [Ω.km ⁻¹]	X [Ω.km ⁻¹]	B [μS.km ⁻¹]	I _d [A]
Jednoduché	150/6	Jednodřík	0,200	0,4165	2,744	400
	185/6	Jednodřík	0,156	0,4091	2,796	455
Dvojité	150/6	Soudek	0,200	0,4220	2,713	800
	185/6	Soudek	0,156	0,4143	2,766	910
	210/3	Soudek	0,130	0,4023	2,852	1 100
	240/6	Soudek	0,125	0,4070	2,817	1 060
	450/6	Soudek	0,065	0,3854	2,982	1 640
	670/8	Donau	0,042	0,3661	3,142	2 200

1.4. Vodiče pro venkovní vedení

1.4.1. Požadavky na vodiče

- malá hmotnost – pro snadnou dopravu a zatížení nosných částí
- velká hmotnost – pro lepší odolnost vůči větru
- malý průměr – kvůli menší námraze a odolnosti proti větru
- velký průměr – kvůli většímu zakřivení plochy z důvodu vzniku koróny
- velká pevnost
- odolnost proti chemickým vlivům
- malý elektrický odpor
- malé pořizovací náklady

Při volbě vodiče je kladen důraz na mechanické i elektrické vlastnosti, přičemž do návrhu zasahují i požadavky ekonomické. [2]

1.4.2. Materiály pro vodiče

Měď

Používá se měď tvrdá s pevností v tahu 400MPa a měď polotvrdá s pevností v tahu 300 Mpa, která se používá pouze pro vedení do 1kV. Měď má nejnižší elektrický odpor z uvedených materiálů a velmi dobrou odolnost proti chemickým a atmosférickým vlivům. [2]

Hliník

Hliník má 1,6 krát vyšší elektrický odpor oproti mědi, 1,4 krát vyšší teplotní roztažnost, ale o 30 % nižší hmotnost. Na vzduchu stálý materiál, ale pro velmi malou pevnost se kombinuje u lan s železem. [2]

Slitiny hliníku

Slitiny hliníku proti čistému hliníku vykazují větší elektrickou pevnost, nejčastěji používaný materiál je Aldrey skládá se z 98,7 % Al, 0,5 Mg, 0,5 % Si a 0,3 % Fe.

Ocel

Ocel je méně odolná proti korozi, proto je nutné ji v lanech proti ní chránit (např. pozinkování). Používá se ocel Fe 35, Fe 50, Fe 70, Fe 130. Ocel je používána především jako nosný materiál, pro velmi dobrou mechanickou pevnost, také pro zemní a kotevní lana. Ocel má velký elektrický odpor, a proto není vhodná pro elektrovodné účely.

1.4.3. Konstrukce vodiče

Dráty

Dráty se používají pouze pro vedení do 1 kV, mohou být provedeny z Cu, Ald, Fe. Dráty jsou omezeny i po stránce průřezu, a to pro Cu 6-25 mm², pro Ald 16-25 mm² a pro Fe 10-20 mm²

Lana prostá

Lana prostá se používají jako vodič pro silová vedení všech napětí. Jsou vyrobeny z Cu, Ald nebo Fe. Vyrábějí se zkrucováním jednotlivých vrstev drátů, při čemž každá vrstva se navíjí opačným směrem, kvůli zamezení rozmotání lana. Ve srovnání s drátem má lano větší hmotnost, větší elektrický odpor, menší pevnost a menší indukčnost. Lano je ohebnější a při provozu bezpečnější.

U lan rozlišujeme průřezy

- Jmenovitý (průřez lana)
- Matematický (součet průřezů vláken lana)
- Elektrický (průřez plného vodiče se stejným odporem)

Lana kombinovaná

Lano kombinované se skládá ze 2 materiálů. Jeden materiál je nosný, má velkou mechanickou pevnost, tvoří duši lana. Druhý zajišťuje dobré elektrovodné vlastnosti, tvoří plášť lana. Používají se kombinace hliníku a železa. Označení AlFe X udává poměr průřezu pláště ku průřezu duše lana. Nejčastěji to jsou lana AlFe 3, AlFe 4, AlFe 6 a AlFe 8. Lana s nižším číslem je potřeba opatřit tlumičem kmitání. [2]

Svazkové vodiče

Používají se především pro vvn vedení. Fázový vodič je tvořen několika vodiči, které jsou paralelně spojeny a propojeny vodičnými propojkami. Tento typ vodiče se používá pro snížení korónových jevů a ztrát. Obvykle se používají 2 až 4 svazkové vodiče. Svazkové vodiče mají vyšší pořizovací náklady, montážní náročnost a větší kapacitu, ale mají menší indukčnost, vyšší proudovou zatížitelnost a vyšší odolnost proti kmitání než klasické lano.

Závěsné kabely

Závěsné kabely našly své uplatnění v sítích nízkého napětí, kde nahrazují klasické přípojky. Konstrukčně je tvořen kabelem s hliníkovými vodiči, které je izolací spojeno k nosnému lanu. [2]

1.5. Kabelové vedení

Kabelové vedení je obvykle nákladnější než vedení venkovní, používá se nejčastěji v městských a průmyslových sítích. Výhody kabelových vedení jsou užší koridor, minimální estetický dopad a odolnost proti klimatickým změnám. [2]

Kabelové vedení se obvykle vyrábí ve variantách

- jednožilové s vlastním kovovým obalem na každé žíle
- vícežilové s vlastním kovovým obalem na každé žíle
- vícežilové s kovovým pláštěm pro všechny žíly

Kabely používané pro rozvod 220/380 V se obvykle vyrábí v 3 fázovém provedení s PVC izolací a společnou izolační obálkou a dle provedení i kovovou fólií. Pro kabely 22kV a 35kV je zde každá žíla opatřena kovovou fólií. Kabel má společné pancéřování nebo jiný krycí obal. U rozvodu napětových hladin 110kV a výš je kabel proveden jednožilově.

Impedance kabelových vedení

Impedance kabelových vedení je dána jako u venkovních vedení činným odporem vedení a induktivní reaktancí. Pro výpočet a určení impedance považujeme 3 fázový kabel jako symetrické vedení, při této symetrii, kdy jsou kabely uspořádány do rovnostranného trojúhelníku není potřeba transpozice pro docílení symetrie. [2]

Kapacita kabelů

Kapacita kabelového vedení je větší než kapacita venkovního vedení se srovnatelnými přenosovými parametry. Je ovlivněna volbou izolace a provedení kabelu. Pokud výrobce neudává kapacitu daného kabelu, lze zjistit měřicí metodou. [1]

$$C = \frac{I_{NAB}}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot l \cdot U_F \cdot 10^{-6}} [\mu F \cdot km] \quad (1.28)$$

Kde I_{NAB} nabíjecí proud [A]
 f síťová frekvence [Hz]
 l délka vedení [km]
 U_F fázové napětí [V]

Tabulka 3: Parametry kabelu 22-AXEKVCEY uložení vedle sebe v zemi [4]

22-AXEKVCEY				
S [mm ²]	I _d [A]	R [Ω/km]	L [mH/km]	C [μF/km]
35	165	0,868	0,7	0,16
50	195	0,641	0,68	0,18
70	237	0,443	0,66	0,2
95	282	0,32	0,64	0,22
120	319	0,253	0,62	0,24
150	352	0,206	0,6	0,26
185	396	0,164	0,59	0,28
240	455	0,125	0,58	0,3

Tabulka 4: Parametry kabelu 1-CYKY uložení v zemi [4]

1-CYKY			
S [mm ²]	I _d [A]	R [Ω/km]	L [mH/km]
3x35+16	161	0,537	0,264
3x50+25	191	0,376	0,264
3x70+35	236	0,269	0,256
3x95+50	280	0,198	0,254
3x120+70	317	0,157	0,249
3x150+70	359	0,125	0,25
3x185+95	401	0,102	0,251
3x240+120	464	0,078	0,246

2. Teoretický rozbor vzniku jednopólových poruch

Při poruše vzniká děj, kdy soustava přechází ze jednoho ustáleného stavu do druhého ustáleného stavu. Tato změna není skoková a doprovází ji přechodový děj. Vznik přechodových jevů může být způsoben změnou zatížení sítě, přepětí nebo poruchou. [5]

Důvody vzniku přechodových dějů:

- změna zatížení sítě
- přírodní vlivy
- poruchy

Poruchy dělíme podle symetrie na:

- symetrické – v každé fázi má porucha stejný průběh.
- nesymetrické – porucha má v každé fázi jiný průběh

Rozdělení poruch podle změny veličiny:

- napěťové – přepětí, podpětí
- proudové – zkraty a nadproudy

Dále mezi jednopólové poruchy patří

- jednofázový zkrat
- zemní spojení

2.1. Zkrat

Zkrat je nejčastější porucha v elektrizační síti. Je to elektromagnetický děj, který vzniká náhodně nebo úmyslně spojením dvou nebo více bodů v obvodu, například spojení fází nebo fází a země. Tyto body obvodu mají při neporuchovém stavu rozdílné napětí. Při zkratu dvou bodů se napětí mezi nimi blíží nule. Následný obvod má velmi malou impedanci a protékají jím zkratové proudy, v blízkosti zkratu obvykle tyto proudy několikanásobně převyšují provozní hodnoty proudů. Rostoucí trend zvyšování výroby a následní spotřeby zapříčinil přenos větších výkonů, tento trend má negativní následek v podobě zvyšování hodnoty zkratových proudů. Na velikost nárazového zkratového proudu mají také vliv točivé stroje provozované v okolí zkratu, které v jeho počátku dodají svou energii do zkratu, a tím zvýší hodnotu nárazového zkratového proudu. [5]

Příčiny vzniku zkratu

- vada izolace z důvodu:
 - o špatné volby materiálu nebo také nevhodné výrobní technologie
 - o špatné montáže
- zhoršení kvality z důvodu zrychlení degradace izolace vlivem dlouhodobého přetěžování, zejména u kabelových vedeních
- přepětí atmosférické i provozní má podíl na porušení izolace a následný zkrat
- cizí zásah je velmi častý důvod vzniku zkratů, jedná se například o překopnutí kabelu během stavebních prací, nebo různé přírodní vlivy například sesuv půdy, nebo pád stromu
- nedostatečná zkratová odolnost
- selhání lidského činitele – chybná manipulace, ponechání cizích předmětů při montáži a demontáži zařízení

Nebezpečné děje při zkratu

Tepelné působení – Zkratové proudy způsobují nadměrné oteplení vodičů, které zkracují životnost izolace. Tyto proudy také naruší mechanickou pevnost vodičů a spojů. Při vzniku elektrického oblouku je nebezpečné riziko vzniku požáru.

Mechanické působení – Velké zkratové proudy vytváří vlivem elektromagnetického pole dynamické rázy, které způsobují těžké namáhání vodičů, elektrických přístrojů, izolátorů, vinutí elektrických strojů a dalších prvků elektrické sítě. Tyto rázy mohou zkrátit životnost těchto prvků nebo v krajním případě zapříčinit jejich destrukci.

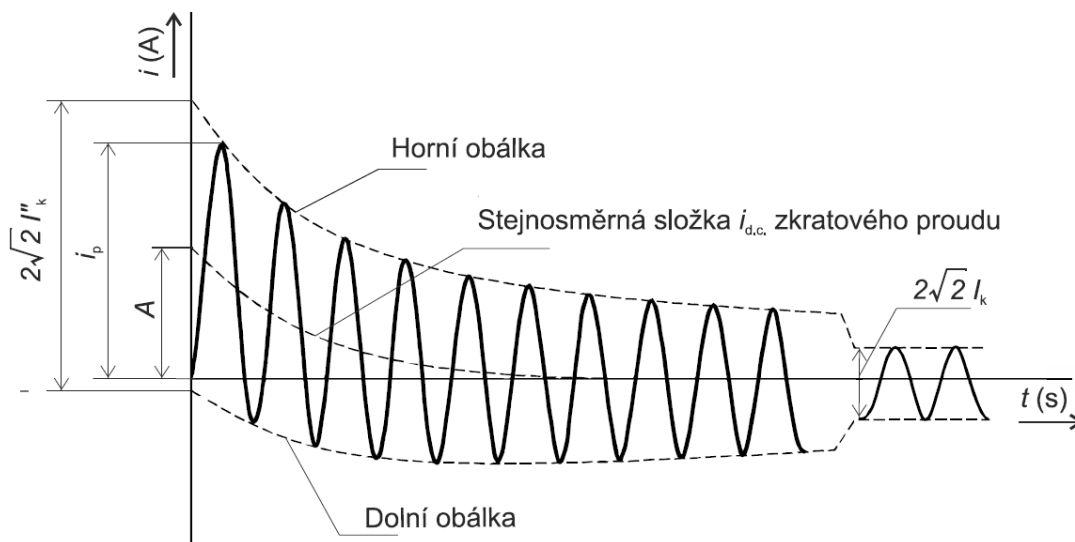
Pokles napětí – Při zkratu nastává pokles napětí z důvodu náhlé snížení impedance elektrického obvodu. Do místa zkratu tečou zkratové proudy ze všech zdrojů, velikost těchto proudů závisí na výkonu zdroje a vzdálenosti mezi zkratem a zdrojem zkratového proudu. Tyto proudy způsobí pokles napětí na vedení. Některé spotřebiče jsou náchylné na poklesy napětí zejména indukční motory, u kterých klesá moment s druhou mocninou napětí nebo může být narušen paralelní chod alternátorů, který může způsobit labilitu soustavy, také na světelné spotřebiče, u kterých klesá svítivost (žárovky), u některých dojde až k úplnému zhasnutí (výbojky zářivky)

Indukované napětí – Zkratové proudy vytváří značné magnetické pole. V důsledku působení tohoto pole se naindukuje napětí na linky sdělovací techniky a dochází k rušení komunikace.

Přepětí – Při vypínání zkratových proudů dochází k přepětí, které může narůst do hodnoty dvojnásobku oproti jmenovitému napětí. Při rozepnutí vzniká zotavené napětí mezi kontakty vypínače, strmost nárůstu zotaveného napětí může porušit izolaci elektrického zařízení. Při překročení izolační pevnosti dochází k opětovanému přeskoku a zapálení elektrického oblouku mezi kontakty a následné destrukci vypínače. [5]

Časový průběh zkratového proudu

Při zkratu dochází k náhlé změně impedance, tato změna vyvolá změnu magnetického pole, která se nemění skokem, proto má zkratový proud neharmonický průběh.



Obrázek 4: Časový průběh zkratového proudu [7]

Časový průběh zkratového proudu se skládá z rázové nebo také nazývaná subtranzitní složky, poté z přechodové – tranzitní složky a následně stejnosměrné neboli aperiodické složky, tento průběh se ustálí na hodnotě, kterou nazýváme ustálený zkratový proud.

Rázová (subtranzitní) složka – má sinusový průběh, trvá méně než desetinu sekundy a její hodnota od začátku zkratu exponenciálně klesá.

Přechodová (tranzitní) složka – má také sinusový průběh i exponenciální průběh, ale její trvání je delší obvykle řádově sekundy.

Stejnosměrná (aperiodická) složka – je to exponenciálně klesající stejnosměrný proud, její velikost závisí na okamžiku, v kterém zkrat nastal. Při proudu čistě induktivního charakteru je složka největší, když napětí v okamžiku zkratu prochází nulou.

Ustálený zkratový proud – je to hodnota zkratového proudu po odeznění přechodových složek [5]

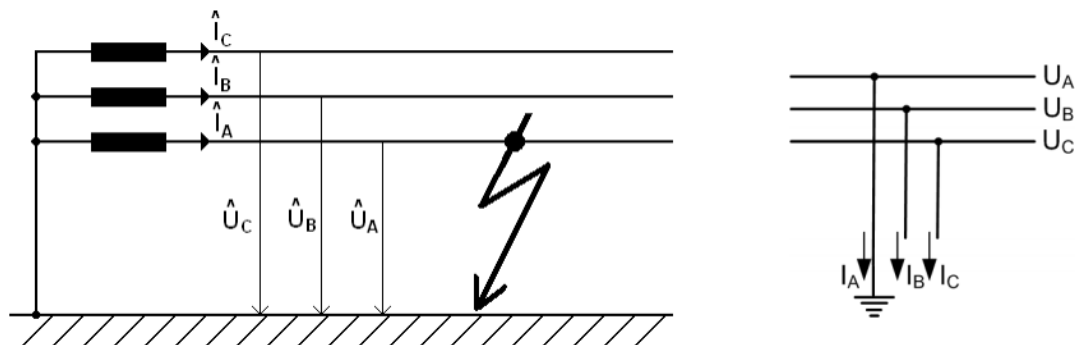
Rozdělení zkratů:

- Podle počtu zasažených fází
 - jednofázové
 - dvoufázové (dvoupólové)
 - dvoufázové zemní (dvoupólové zemní)
 - trojfázové (trojpólové)
 - trojfázové zemní (trojpólové zemní)
 - simultánní zkrat – spojení dvou fází se zemí v odlišných místech
- Podle dokonalosti spojení
 - dokonalý zkrat – body s různými potenciály jsou dokonale spojeny, impedance v místě spojení je minimální
 - nedokonalý zkrat – body jsou propojeny přes nezanedbatelnou impedanci. Tato velikost impedance má vliv na zkratový proud
 - obloukový zkrat – při přiblížení vodičů se sníží izolační pevnost vzduchu mezi nimi a nastává elektrický oblouk.

Tabulka 5: Četnost výskytu jednotlivých zkratů [6]

Druh zkratu	Relativní pravděpodobnost výskytu [%]		
	vn	110 kV	220 kV
Trojfázový	5	0,4	0,9
Dvoufázový	10	4,8	0,6
Dvoufázový zemní	20	3,8	5,4
Jednofázový	65	91	93,1

2.2. Zkrat jednofázový:



Obrázek 5: Jednofázový zkrat [7]

Charakteristické rovnice vyplývající z výše uvedeného obr. č. 5

$$U_A = 0 \quad I_B = 0 \quad I_C = 0 \quad (2.1)$$

Přechodem ke složkovým veličinám získáme rovnice složkových proudů

$$I_F = F^{-1} \cdot I = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_A \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} I_A \\ I_A \\ I_A \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

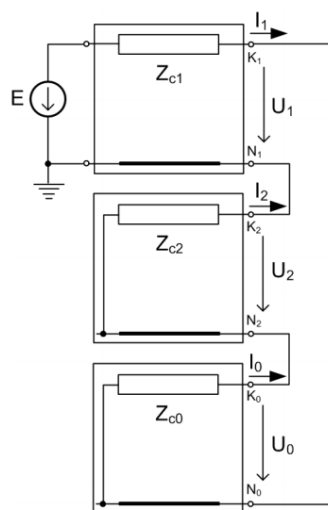
Z kterých plyne tato rovnice

$$I_1 = I_2 = I_0 = \frac{1}{3} I_A \quad (2.3)$$

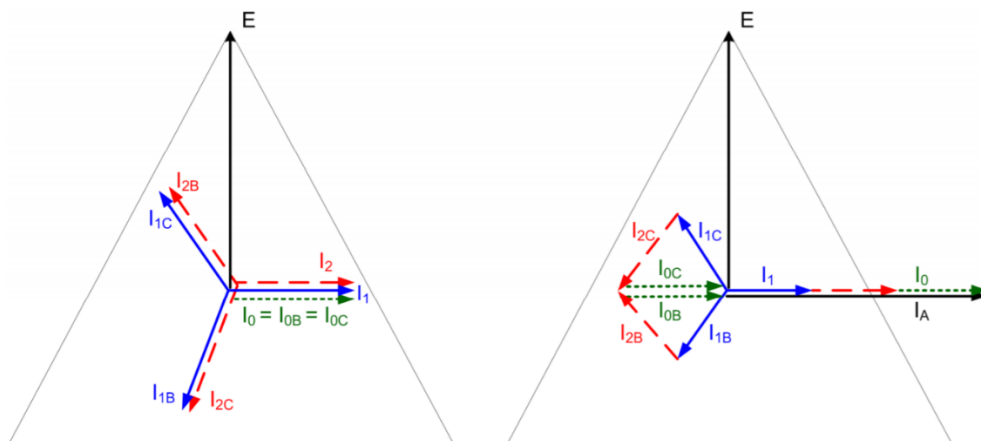
Pro složkové proudy dále platí:

$$I_1 = I_2 = I_0 = \frac{\bar{E}}{\bar{Z}_{C1} + \bar{Z}_{C2} + \bar{Z}_{C0}} \quad (2.4)$$

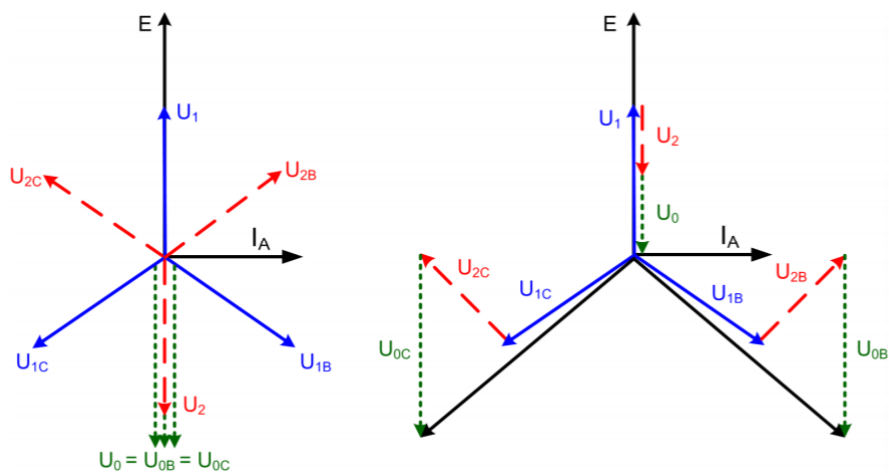
$$\bar{I}_A = 3\bar{I}_B \quad \bar{I}_B = 0 \quad \bar{I}_C = 0 \quad (2.5)$$



Obrázek 6: Složky jednofázového zkratu [7]



Obrázek 7: Fázorový diagram proudů [7]



Obrázek 8: Fázorový diagram napětí [7]

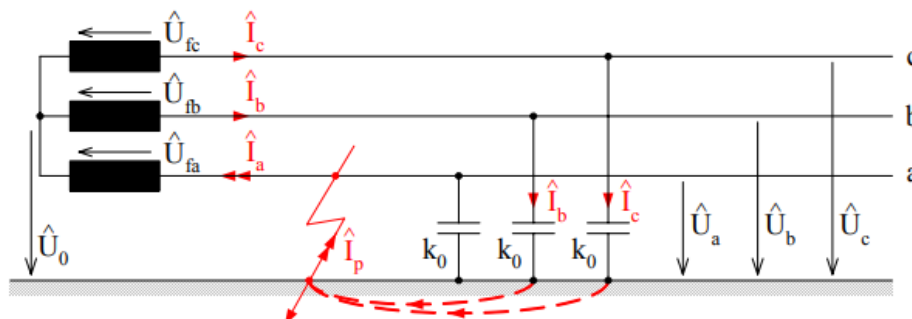
2.3. Zemní spojení

Sítě vysokého napětí, které nemají uzemněný uzel se hojně nachází v České republice, tyto sítě se používají v městech, na vesnicích i pro připojení průmyslových závodů. Při provozu tyto sítě ohrožují cizí zásahy, přepětí a atmosférické vlivy. Působení těchto nežádoucích jevů má za následek izolační vady a vznik zemního spojení. Proud zemního spojení na rozdíl od proudu zkratového má kapacitní charakter, a je několikanásobně menší než zkratový. Tento proud je téměř nezávislý na vzdálenosti od zdroje, ale je vymezen kapacitou vodičů vůči zemi. Výhodou této sítě je provozuschopnost s jednou poruchou sítě. [8]

Zemní spojení můžeme rozdělit podle:

- velikosti přechodového odporu v místě zemního spojení:
 - odporová zemní spojení – hodnota přechodového odporu několik set ohmů
 - kovová a oblouková zemní spojení – přechodový odpor je několik ohmů
- podle doby trvání
 - mžiková zemní spojení – do 0,5 s
 - krátkodobá zemní spojení – do 5 minut
 - přerušovaná zemní spojení – opakující se mžiková nebo krátkodobá přerušení
 - trvalá zemní spojení – až do okamžiku odstranění (několik hodin)

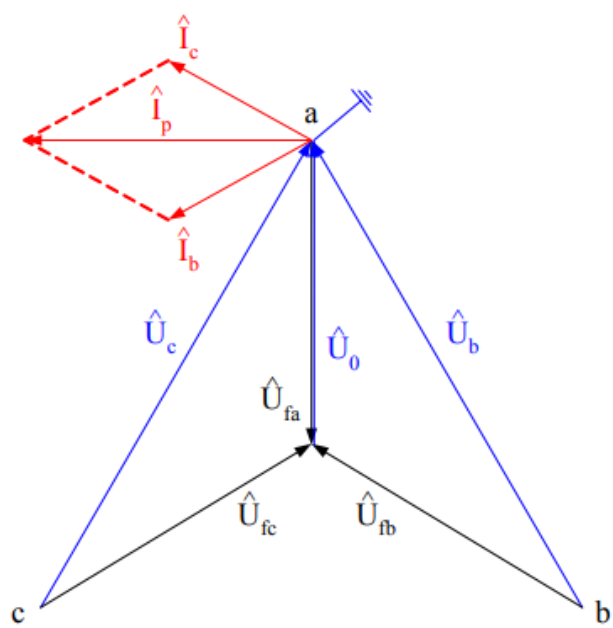
U venkovních vedení provozovaných na hladině 22 kV, se pohybuje poruchový zemní kapacitní proud 0,63 A/km. U kabelových vedení dosahují měrné kapacity mnohem vyšších hodnot, u průřezů 120 až 240 mm² můžeme počítat s hodnotami 3,5 až 4,5 A/km



Obrázek 9: Zemní spojení [8]

$$\bar{I}_p = \bar{I}_a = \bar{I}_b + \bar{I}_c \quad (2.6)$$

$$\bar{I}_p = 3j\omega k_0 \bar{U}_0 \quad (2.7)$$



Obrázek 10: Napěťové a proudové poměry při zemním spojení [8]

3. Možnosti kompenzace zemních kapacitních proudů

Kompenzace zemních kapacitních proudů je doporučena tam, kde zemní proudy dosahují hodnot nad 5 A, v případech, kde zemní proudy převyšují hodnotu 10 A je kompenzace nutná. V rozlehlých sítích, kde vzniká zemní kapacitní proud větší než 5 A, vzniká oblouk, který se rozrůstá a způsobuje poničení dřevěných stožárů a vytváří vícefázové zkraty při zasažení ostatních fází. V důsledku kolísání napětí, může docházet ke zhášení a opětovanému zápalu oblouku. Při vhodné kompenzaci kapacitních zemních proudů se proud omezí na minimální hodnotu a tím oblouk uhasíná. Kompenzace také sníží přepětí, dotykové napětí a riziko destrukce izolátorů

Provedení kompenzace kapacitních zemních proudů

- uzemnění uzlu přes zhášecí tlumivku
- uzemnění přes rezistor
- uzemnění s paralelním připínáním rezistoru k tlumivce
- pomocí řízeného zdroje

3.1. Uzemnění uzlu přes zhášecí tlumivku

Pro kompenzaci zemního spojení na venkovním vedení, je nejčastěji používána metoda kompenzace pomocí plynule regulovatelné zhášecí Petersenovy tlumivky. Jejich úkolem je udržet zemní kapacitní proud pod akceptovatelnou hodnotou. V této situaci lze síť provozovat bez nutnosti odstavit dodávku energie. Zhášecí tlumivka se instaluje mezi uzel transformátoru a zem. Proud zemního spojení má kapacitní charakter a proud zhášecí tlumivky má charakter induktivní. V ideálním případě jsou tyto proudy stejné a celý systém se naladí do rezonance. Ve skutečnosti kapacitní zemní proud nemá čistě kapacitní proud a tlumivka nedodává čistě induktivní proud, ani tyto dva proudy nejsou stejné, proto nastává stav, kdy v obvodu teče po kompenzaci protéká činný zbytkový proud. Jeho velikost je ale malá, a následně způsobí uhasnutí oblouku. [5]

Konstrukce zhášecí tlumivky

Parametry sítě jsou proměnné podle aktuálního zatížení a místo kde vznikne porucha je jiné. Kvůli těmto faktorům musí být zhášecí tlumivka vybavena regulací. Jejich konstrukce je specifická, regulace je docílena plynulou změnou vzduchové mezery cívek nasazených na magnetickém obvodu. Pohyb zajišťuje elektromotor s převodovkou řízený elektronickým regulátorem. Indukčnost tlumivky se tak neustále přizpůsobuje parametrům sítě. Také je nutné počítat z možným rozšíření sítě. [6]

Dimenzování tlumivky

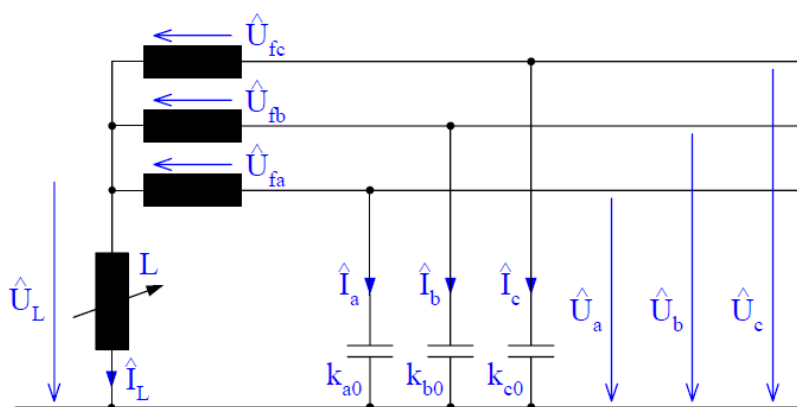
Proud tlumivkou

$$I_L = \left(1 \pm \frac{\varepsilon}{100}\right) \cdot \sqrt{3} \cdot \omega \cdot C \cdot U \quad (3.1)$$

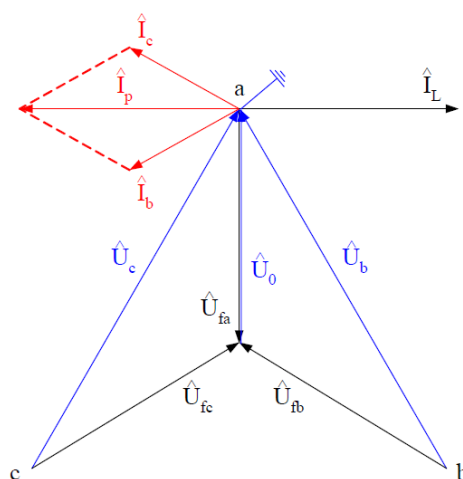
Kde ε poměrné ladění tlumivky

Indukčnost tlumivky

$$I_L = \left(1 \pm \frac{\varepsilon}{100}\right) \cdot \sqrt{3} \cdot \omega \cdot C \cdot U \quad (3.2)$$



Obrázek 11: Uzemnění přes tlumivku [8]



Obrázek 12: Napěťové a proudové poměry při zemním spojení s kompenzací pomocí tlumivky [8]

3.2. Uzemnění přes rezistor

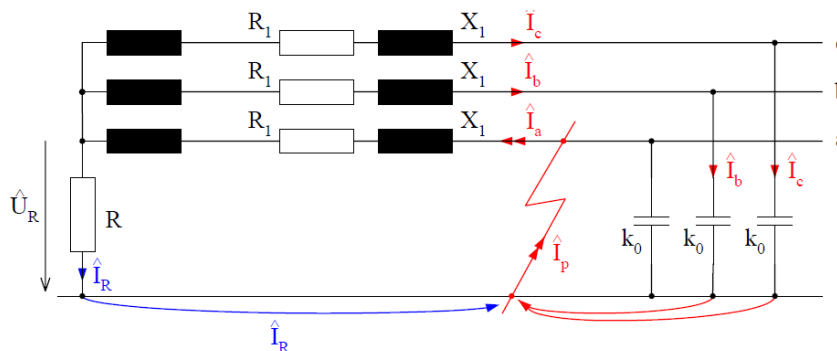
Tento typ kompenzace se využívá zejména v kabelových sítích, kdy porucha nelze jednoduše odstranit a nedojde ke samozhašení poruch. Zhášecí tlumivka neplní funkci omezovače napětí a při vzniku poruchy následné přepětí poruší izolaci zdravých fází. Uzel soustavy je uzemněn přes činný odpor. V případě vzniku poruchy se napětí uzlu zvýší na hodnotu fázového napětí a na postižené fázi napětí poklesne. Proud tekoucí při poruše je dán součtem proud kapacitního a proudu činného. Vhodnou volbou rezistoru docílíme snížení zkratového proudu. [8]

Podmínka tlumení:

$$I_L = \left(1 \pm \frac{\varepsilon}{100}\right) \cdot \sqrt{3} \cdot \omega \cdot C \cdot U \quad (3.2)$$

Kde I_R Činný proud [A]

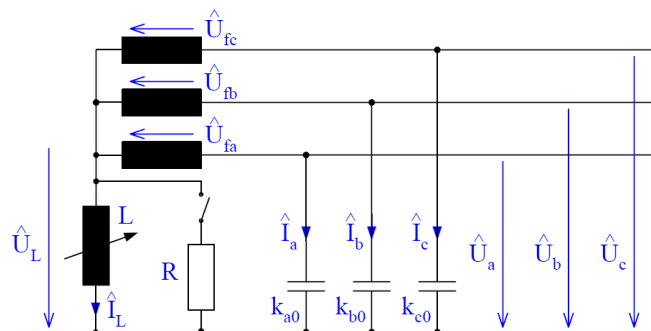
I_K Kapacitní proud [A]



Obrázek 13 : Uzemnění přes rezistor [8]

3.3. Uzemnění s paralelním připojováním rezistoru k tlumivce

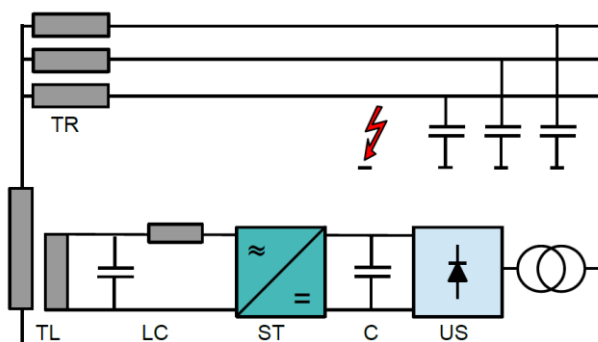
Tato kompenzace kombinuje předchozí metody. Při zemním spojení se ke kompenzační tlumivce připojí rezistor, ten docílí zvýšení poruchového proudu, který následně detekují zemní ochrany. Vhodným nastavením času, kdy od doby detekce zemního spojení připojíme rezistor, zamezíme spínání rezistoru při zemním spojení, které by samo zhaslo. Měřicí technika detekuje zemní spojení díky zvýšení napětí na měřicím vinutí zhášecí tlumivky. Automatika je zvolena pro dva režimy, pro síť se signalizací zemního spojení, kde se předpokládá provoz s poruchou. Druhý režim je pro síť s vypínáním při poruše, u této sítě je potřeba připojit rezistor vždy při detekování poruchy. [8]



Obrázek 14: Uzemnění s paralelním připojáním rezistoru k tlumivce [8]

3.4. Pomocí řízeného zdroje

Tato nová metoda byla vynalezena díky rozvoji polovodičové techniky. Použitý řízený zdroj dokáže generovat libovolný signál, díky této vlastnosti může v bezporuchovém stavu vyrovnávat nesymetrii soustavy. Při zemní poruše je generován proud s opačnou fází, který vykompenzuje zemní kapacitní proud. [9]



Obrázek 15: Zapojení řízeného zdroje do sítě [9]

4. Možnosti lokalizace poruchy

Pro detekci a následnou lokalizaci vycházíme z jevů, které při zemním spojení nastávají, jsou to především:

- snížení napětí fáze vůči zemi
- zvýšení napětí na nepoškozených fázích až na sdruženou hodnotu napětí
- vznik napětí mezi uzlem transformátoru a zemí
- tok proudu v zemním vodiči
- vznik nulové složky napětí

Při vzniku zemního spojení nejdříve určíme postiženou fázi vedení, poté zemní spojení lokalizujeme.

Metody můžeme rozdělit do skupin na metody:

- Aktivní
- Pasivní, které dále dělíme na metody:
 - o Statické
 - o Dynamické

Aktivní metody lokalizace zemního spojení jsou založeny na lokalizaci zemního spojení pomocí pomocného signálu se specifickou frekvencí. Tento signál je při poruše poslán do soustavy a následně stopován. Tyto metody, nejsou kvůli technické náročnosti často využívány.

Pasivní metody jsou založené na principu, kdy stopovaný signál není dodán externě do sítě, ale je založen na sledování napětí a proudu dané soustavy bez použití externího zdroje. Pokud sledujeme hodnoty ustálené, po odeznění přechodného děje mluvíme o metodách statických a metody dynamické jsou ty, které vyhodnocují napěťové a proudové děje při přechodném ději.

Metody statické jsou takové, u kterých vyhodnocujeme místo poruchy po odeznění přechodného děje. U některých metod pracujeme se stavem před poruchou a následně srovnáváme se stavem po poruše.

Metody dynamické vyhodnocují a lokalizují poruchu pomocí transientního jevu, který je vyvolán vznikem zemního spojení. Tyto metody jsou rozšířeny převážně v kompenzovaných sítích, kde nahrazují metody statické. Výhoda těchto metod je dána vyšší citlivostí. Nevýhodou je zejména ve většině případů pouze jeden pokus pro lokalizaci poruchy.

4.1. Metody statické vhodné pro izolované distribuční soustavy:

Metoda založená na porovnávání amplitudy netočivé složky proudu.

Tato metoda je založena na měření netočivé složky proudu. Pokud při poruše překročí netočivé napětí předdefinovanou hodnotu, dojde k měření netočivých složek proudů. Vedení, které má nejvyšší amplitudu netočivého proudu je vyhodnoceno jako postižené. V případech, kdy zemní spojení je vysoko-impedanční, nebo kdy kapacita postiženého vývodu se blíží kapacitě soustavy, jsou kladeny velké nároky na přesnost měření netočivé složky proudu. [6]

Porovnání fáze netočivých proudů

Metoda založená na porovnávání fází netočivých proudů, při zemním spojení je fáze netočivého proudu postiženého vývodu opačná oproti fázím netočivého proudu zbylých vývodů. Stejně jako u předchozí metody je obtížné vyhodnotit vysoko-impedanční spojení nebo zemní spojení v sítích s velmi krátkým vedením. Přesnost můžeme zvýšit kombinací této metody s metodou výše uvedenou.

Určení toku netočivé složky jalového výkonu

Při této metodě se určí fázový posun netočivé složky napětí vůči netočí složce proudu. U postiženého vývodu předbíhá netočivá složka napětí o 90° netočivou složku proudu, u nepostiženého vývodu se netočivá složka napětí zpožďuje vůči netočivé složce proudu rovněž o 90° . Výhodou této metody je, že stačí určit tok jalového výkonu. Je-li jalový výkon záporný, je vyhodnocen vývod jako postižený. Obtížnější je lokalizovat zemní spojení u poruch s malým netočivým proudem. [6]

Metoda maximální změny netočivého proudu

Pro tuto metodu je nutné vybrat referenční signál netočivé složky proudu společně s fázovým posunem netočivé složky napětí. Po vzniku zemního spojení je postižený vývod ten, u kterého je největší změna jalové složky netočivého proudu.

4.2. Metody statické vhodné pro kompenzované distribuční soustavy:

Wattmetrická metoda

Při zemním spojení v kompenzované síti nedochází k dokonalému vykompenzování poruchového proudu. Tento fakt, nám umožňuje použít pro lokalizaci zemního spojení směr zbytkového proudu. U postiženého vývodu je směr činné složky netočivého proudu a taktéž činný výkon netočivé složky opačný než u zbylých nepostižených fází. Pro správné vyhodnocení je důležitá velikost zbytkového proudu a je nutné vhodně navrhnout proudové transformátory. Pro zvýšení hodnoty zbytkové proudu je možné krátkodobě připojit pomocný odporník.

Admitanční metoda netočivé složky

Definujeme hodnotu netočivé složky napětí a proudu, při překročení definovaných hodnot se vypočte admitance. Vlivem nesymetrie systému je nutno použít metodu, která počítá s přírůstkem netočivého napětí a netočivého proudu před a při poruše. [6]

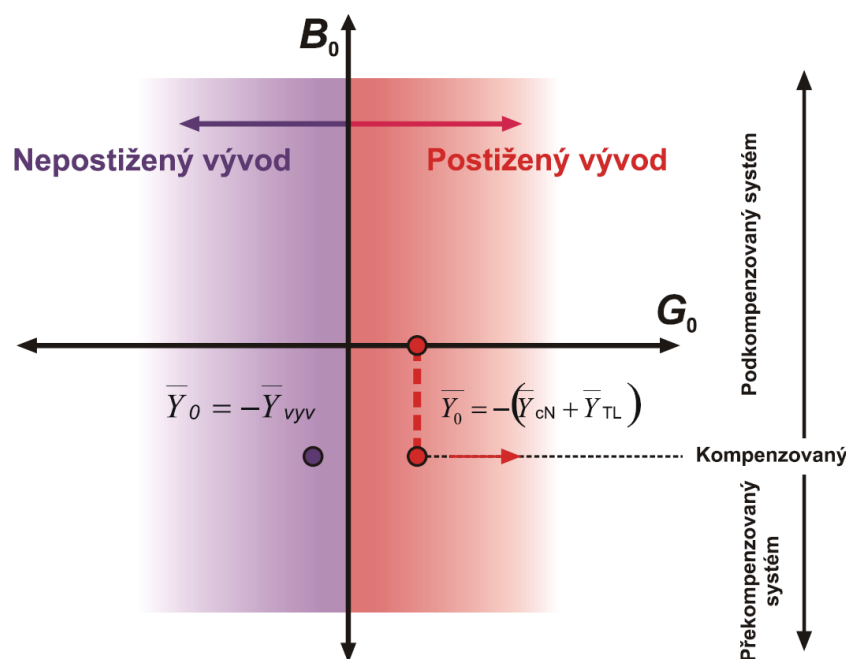
$$\bar{Y}_0 = \frac{(\bar{I}_{0,\text{fault}} - \bar{I}_{0,\text{prefault}})}{(\bar{U}_{0,\text{fault}} - \bar{U}_{0,\text{prefault}})} = \frac{\Delta \bar{I}_0}{-\Delta \bar{U}_0} \quad (4.1)$$

Vývod, který není postižen má admitanci rovnou celkové admitanci chráněného vývodu a má záporné znaménko.

$$\bar{Y}_0 = -\bar{Y}_{v_{yv}} = -(G_v + jB_v) \quad (4.2)$$

V praxi dochází k tomu, kdy výsledná admitance je kladná, tento jev je dán nepřesností výpočtu a velmi malou hodnotou složek \bar{I}_0 a \bar{U}_0 . Taktéž vypočtená susceptance B_v může být kladná vlivem chyby měření nebo při decentrální kompenzaci a v podkompenzovaném stavu systému. Indikace stavu postiženého vývodu je založena na rovnici:

$$\bar{Y}_0 = -(\bar{Y}_{cN} + \bar{Y}_{TL}) \quad (4.3)$$



Obrázek 16: Příklad charakteristiky wattmetrického článku [6]

Admitanční metoda násobků základní harmonické

Tato metoda je založena na využití 5. té harmonické netočivého proudu a napětí. Tato harmonická složka je zvolena pro nejvyšší zastoupení v poruchovém proudu a není kompenzována zhašecí tlumivkou. Při této metodě se provádí výpočet a vyhodnocení admitance pouze pro výše uvedenou frekvenční složku, kdy se systém chová jako nekompenzovaný.

Admitanční metoda v okružní síti

Admitanční metoda lze využít i v případě kruhové sítě. U sítě v radiálním provozu je nutné při poruše síť uvést do okružního provozu, kdy sledujeme přerozdělení netočivé složky proudu. Rozdělení vychází dle poměru admitance paralelních větví a na základě rozdělení určíme místo poruchy. Zvýšení účinnosti této metody lze dosáhnout uchováním dat již vyhodnocených poruch. V případě sítí, které jsou provozovány v bezporuchovém stavu jako okružní, dochází při vzniku zemního spojení ke krátkodobému připojení pomocné kapacity k výkonovému vinutí zhašecí tlumivky. Při této operaci sledujeme změnu netočivé složky proudu před a po připojení, na základě přerozdělení přírůstku netočivé složky proudu lokalizujeme místo poruchy. [6]

Konduktanční metoda

Metoda je založená na podobném principu jako metoda Admitanční s rozdílem že u této metody používáme pouze vyhodnocení konduktance, kterou vypočteme z netočiví složky proudu a napětí. Pro postižený vývod platí:

$$G_O = Re \left[\frac{\bar{I}_0}{\bar{U}_0} \right] = -(G_{cN} + G_{TL}) \quad (4.4)$$

Kde G_{cN} netočivá konduktance respektující svod zbývajících nepostižených vývodů

G_{TL} netočivá konduktance odpovídající ekvivalentu zhášecí tlumivky

Pro nepostižený vývod dále platí:

$$G_O = Re \left[\frac{\bar{I}_0}{\bar{U}_0} \right] = -(G_{cN} + G_{TL}) \quad (4.5)$$

Kde G_v je netočivá konduktance chráněného vývodu

Konduktanční metoda s měřením přírůstku

Stejně jako ekvivalent Admitanční metody je i tento založen na porovnání přírůstku netočivé složky proudu a napětí při poruchovém stavu se stavem před poruchou. U této metody se nepotýkáme s problémy způsobené nesymetrií systému a chybou měřicích transformátorů proudu.

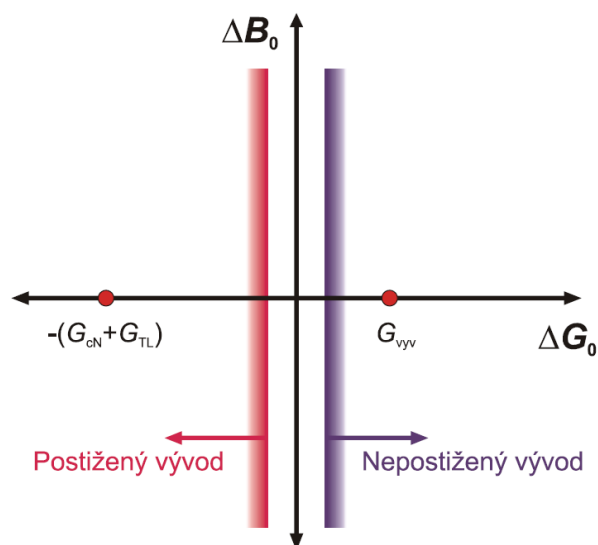
Pro postižený vývod platí:

$$\Delta G_O = Re \left[\frac{\Delta \bar{I}_0}{\Delta \bar{U}_0} \right] = -(G_{cN} + G_{TL}) \quad (4.6)$$

Pro nepostižený:

$$\Delta G_O = Re \left[\frac{\Delta \bar{I}_0}{\Delta \bar{U}_0} \right] = (G_v) \quad (4.6)$$

Pro optimalizování výsledků dosáhneme nejlepší výsledek kombinací této metody s automatikou připínání pomocného odporu. [6]

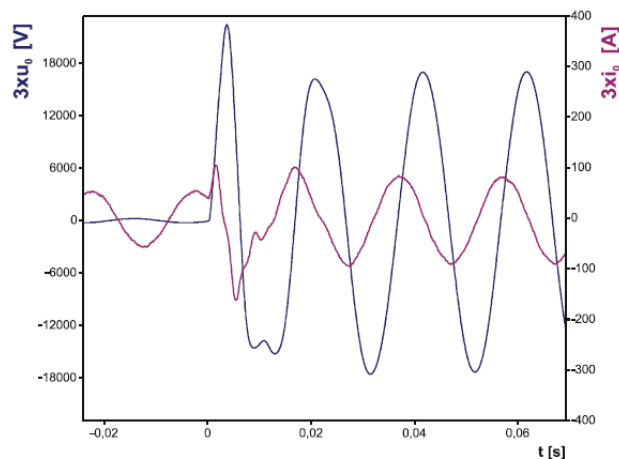


Obrázek 17: Pracovní charakteristika přírůstkového konduktančního článku [6]

4.3. Metody dynamické

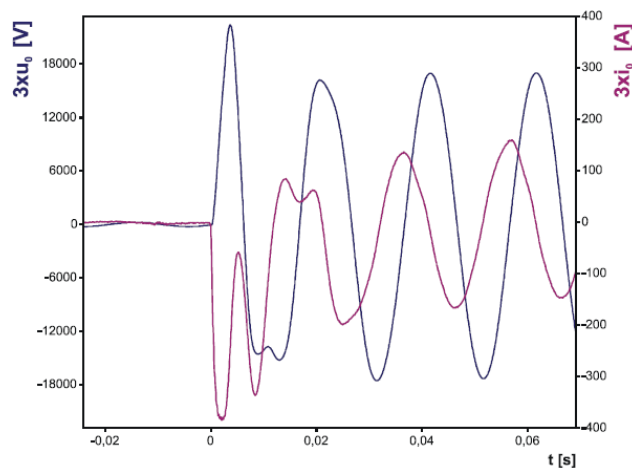
Metoda první půl-periody

Při vzniku zemního spojení dochází k přechodovému ději, který je způsoben vlivem jednotlivých kapacit vedení. Tento je způsobuje vybití kapacity postižené fáze vedení a nabití nepostižených fází vedení v celé soustavě. Výsledkem je vybíjecí proud, trvající řádově milisekundy, obvykle tedy odezní v první půlperiodě. Metoda je založena na porovnání oscilografického průběhu netočivých složek bezprostředně po vzniku poruchy. Oscilografický průběh nepostiženého vývodu, je ten, kde je během první půlperiody po vzniku zemního spojení netočivá složka proudu a napětí ve fázi viz. Obr. č. 18.



Obrázek 18: Oscilografický průběh nepostiženého vývodu [6]

Postižený vývod je ten, kde je naměřená netočivá složka napětí v protifázi s naměřenou netočivou složkou proudu viz obr. č. 19



Obrázek 19: Oscilografický průběh postiženého vývodu [6]

Výhodou této metody je možnost nasazení v neúčinně uzemněných sítí a možnosti lokalizace i obloukového spojení. Hlavní nevýhoda je krátký časový interval, kdy můžeme poruchu vyhodnotit.

Metoda qu diagramu

Tato metoda je založena na vyhodnocení grafické závislosti netočivé složky proudu na netočivé složce napětí. V případě nepostiženého vedení je dán proces rovnicemi:

$$u_o(t) = u_o(t_0) + \frac{1}{C_{eq}} \int_{t_0}^t i_o(\tau) d\tau \quad (4.8)$$

$$u_o(t) = u_o(t_0) + \frac{q_o(t)}{C_{eq}} \quad (4.9)$$

Kde t_0 čas vzniku zemního spojení

C_{eq} ekvivalentní kapacita mezi vodičem a zemí všech nepostižených vedení v celé síti

i_0 okamžitá hodnota netočivé složky proudu, procházející monitorovaným nepostiženým vedením

Vycházíme-li z faktu, že v momentě vzniku zemního spojení je okamžitá hodnota netočivé složky proudu rovna nule, pak výsledná závislost integrálu netočivé složky proudu na netočivé složce napětí je ovlivněna ekvivalentní kapacitou C_{eq} . V případě nepostiženého vedení platí závislost netočivé složky napětí na netočivé složce náboje:

$$u_o(t) = \frac{q_o(t)}{C_{eq}} \quad (4.10)$$

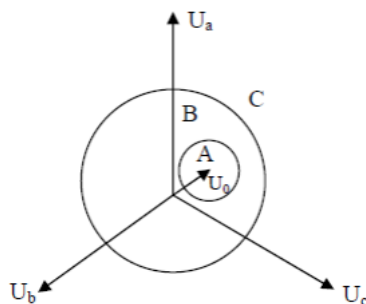
Výsledkem této rovnice, je grafické znázornění v podobě přímky s gradientem C_{eq} , při postižené fázi vedení, tato rovnice neplatí, neboť vybíjecí proud má opačný směr a taktéž gradient bude opačný. U kompenzovaných sítí vlivem zhášecí tlumivky nebude závislost lineární

Metoda qu2 diagramu

Tato metoda vznikla zdokonalením metody qu diagramu, která filtruje netočivé složky proudu a napětí, filtr odstraní frekvenční složky netočivých proudů a napětí a proud v bezporuchovém stavu ze záznamu, tyto složky vznikají nesymetrií či nelinearitou zátěže. Tím můžeme zkoumat pouze netočivé složky způsobené nesymetrií poruchy. Výsledné vyhodnocení má vyšší citlivost a menší míru zkreslení.

Švédská neutrála

Tento ochranný systém indukuje a následně automaticky kompenzuje zbytkový proud zemních poruch. Systém je zapojen do uzlu hvězdy napájecího transformátoru. Je složen z prvků pro kompenzaci zbytkového proudu, lokalizaci a indikaci poruchy. [10]



Obrázek 20: Znázornění oblastí A, B a C [10]

V bezporuchovém stavu je poloha U_0 v oblasti A, při změnách zapojení v síti se pohybuje v oblasti B a při zemním spojení v oblasti C.

Metoda částečných výbojů

Metoda zaměřená na indikaci poruchy uvnitř izolovaných vysokonapěťových vodičů venkovního vedení. Tyto vodiče mají dobré izolační vlastnosti, které ztíží následnou detekci zemního spojení. Tato metoda je postavena na monitoringu impulzních složek částečných výbojů vzniklých na povrchu zasaženého vodiče. Vhodnou filtrací signálu lze rozeznat jednotlivé poruchy. [6]

4.4. Lokalizační metody

Vizuální lokalizace místa zemního spojení pracovníkem údržby

Jako základní používaná metoda, která nepotřebuje složitou techniku, se používá vizuální kontrola údržbou. Tato kontrola odhalí viditelné poruchy například pád stromu na vedení. Tuto vizuální kontrolu předchází bližší určení místa poruchy

Lokalizace místa postupným vypínáním úseků

Tato metoda lokalizace je založena na vypnutí co největší části postiženého úseku vedení. Pro zrealizování tohoto cíle se využívá ovládání pomocí dálkově řízených úsečnickových odpojovačů. Tato metoda se může realizovat tam, kde nedojde v důsledku odpojování ke ztrátě dodávky elektrické energie a následným škodám. Při spínání a vypínání mohou také vznikat nebezpečné stavy, zejména přepětí, které mohou snížit životnost prvků soustavy. Hlavní nevýhody této metody je zdlouhavý a neekonomický proces.

Spojování postiženého vývodu do okruhu

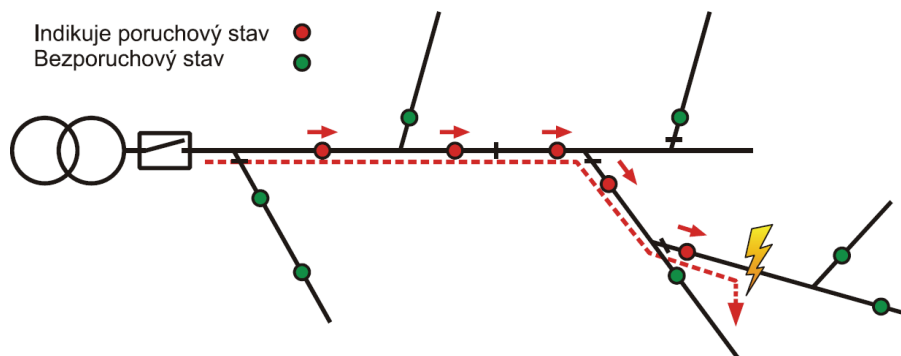
Spojením postiženého a nepostiženého vývodu do okruhu se přerozdělí netočivá složka proudu. Tuto metodu není vždy možné realizovat z důvodu nemožnosti spojení postiženého a nepostiženého vývodu vycházejícího ze stejné přípojnice. Dalším omezením je homogenita parametrů vedení při vyšší četnosti úseků s rozdílnými parametry.

Indikátory poruch pro venkovní vedení

Nedostatky výše uvedené metody zapříčinili vývoj indikátorů poruchy. Indikátor poruchy je zařízení, které monitoruje proudové a napěťové poměry a vyhodnocuje směr poruchy. Charakteristické změny nejčastěji netočivých proudů a napětí jsou zpracovány a následně vyhodnoceny algoritmy, které vycházejí z doposud známých kombinací metod jak dynamických, tak statických. Konstrukce indikátoru, je odlišná v závislosti na zemi, v které je aplikována. Mezi nejrozšířenější typy patří indikátory pracující na principu monitorování elektrického a magnetického pole chráněného vedení. Jejich konstrukce umožňuje snadnou instalaci a montáž v libovolném místě chráněného vedení, při níž je zachována dodávka energie. Podle počtu senzorů lze indikátory poruch rozčlenit do dvou základních kategorií, a to na indikátory snímající celkové elektrické a magnetické pole a indikátory snímající elektrické a magnetické pole jednotlivých fází.

Skupina indikátorů měřící výsledné elektrické a magnetické pole, jsou vybaveny pouze jedním senzorem, který měří sumaci elektrických a magnetických polí. Změna těchto polí je úměrná změně netočivých složek napětí a proudu. Poruchové stavy jsou indikovány dle typu pomocí blikání indikátoru, dálkové komunikace s dispečinkem nebo indikačními terčíky. Výhody těchto indikátorů je nízká cena, malý rozměr snadná instalace, mezi nevýhody patří nízká citlivost.

Lokalizace probíhá na základě určení směru poruchy a znalosti topologie sítě. [6]



Obrázek 21: Lokalizace místa zemního spojení pomocí indikátorů poruch [6]

Mobilní indikátor poruch:

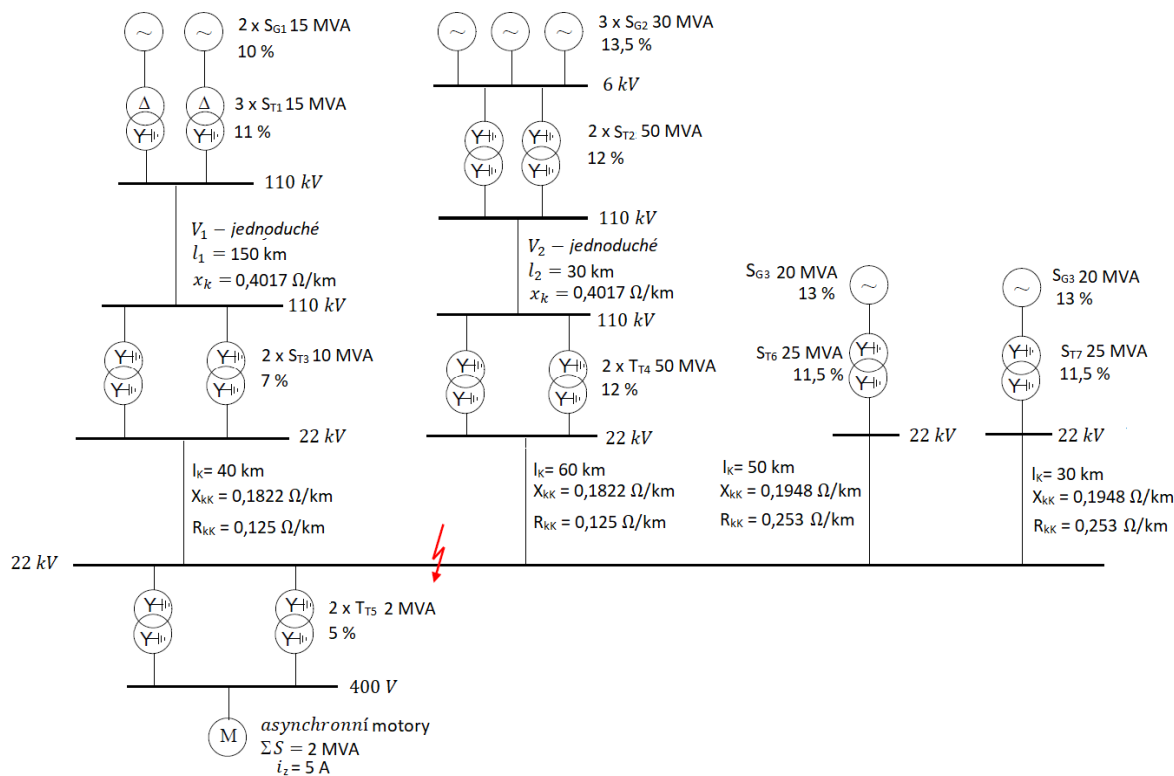
Tato nově vyvinutá metoda je založen na snímání elektromagnetického pole. Toto zařízení vyhodnocuje směr poruchy pomocí vyšších harmonických. Pro detekci je vysílána obsluha, která pochůzkou stopuje místo poruchy.

Indikátory pro kabelová vedení

Větší citlivost těchto indikátorů je zaručena jednodušším a přesnějším měření netočivé složky proudu. Tato metoda je prakticky realizována ve finské kabelové síti, kde se využívá víceúčelové monitory, které jsou nainstalovány uvnitř jednotlivých distribučních stanic pro měření oteplení transformátoru a pro měření proudových poměrů na straně nn. Pro lokalizaci zemního spojení je přivedeno do jednotky měření z průvlakového transformátoru proudu, který je nainstalován na průběžném vedení primární strany distribučního transformátoru. Systém pomocí měření netočivých složek proudu vyšších harmonických detekuje zemní spojení a následně je pomocí indikátorů místo poruchy vystopováno. [6]

5. Výpočet

5.1. Výpočet jednofázového zkratu v uzemněné síti



Obrázek 22: Schéma sítě, pro řešení zkratu

5.1.1. Výpočet parametrů

Indukčnost vedení V_1

$$L_{Cstř} = \frac{1}{3} (L_{C1} + L_{C2} + L_{C3}) = 0,46 \cdot \log \frac{\sqrt[3]{a_{12} \cdot a_{13} \cdot a_{23}}}{r} + 0,05$$

$$a_{12} = \sqrt{5,35^2 + 1,75^2} = 5,629 \text{ m}$$

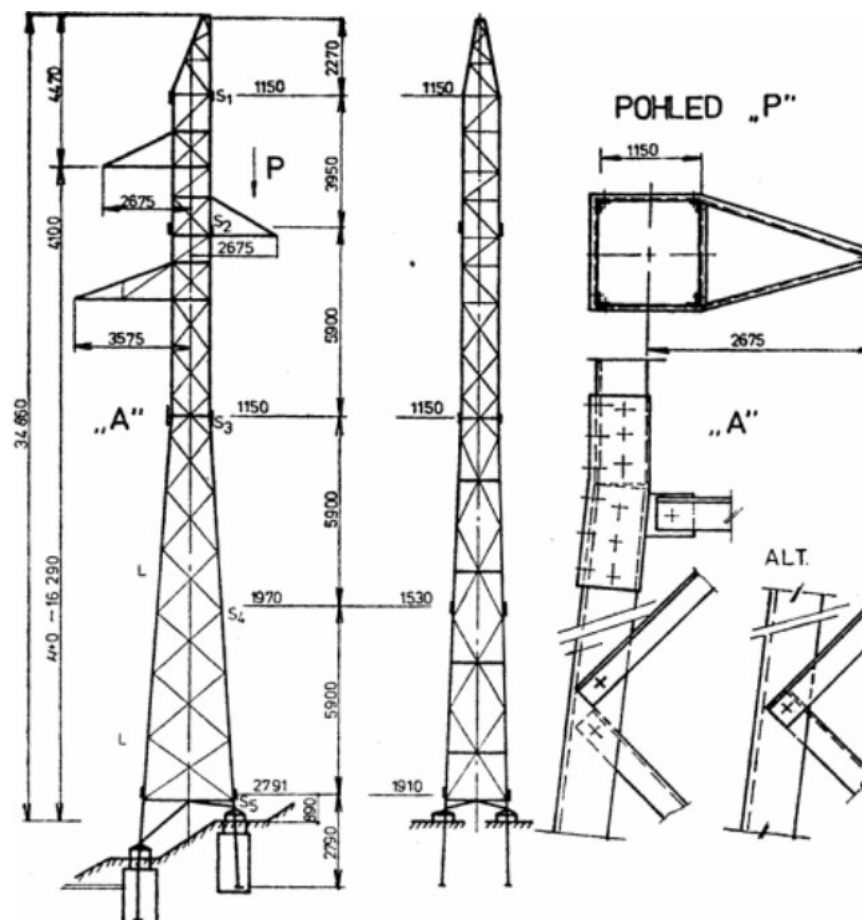
$$a_{13} = \sqrt{3,5^2 + 0,9^2} = 3,614 \text{ m}$$

$$a_{23} = \sqrt{6,25^2 + 1,75^2} = 6,49 \text{ m}$$

Průměr AlFe 240mm² = 21,7 mm

$$L_{Cstř} = 0,46 \cdot \log \frac{\sqrt[3]{5,629 \cdot 3,614 \cdot 6,49}}{10,85 \cdot 10^{-3}} + 0,05 = 1,279 \text{ mH/km}$$

$$X_l = \omega \cdot L_{Cstř} = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L_{Cstř} = 2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 1,275 \cdot 10^{-3} = 0,4018 \text{ } \Omega/\text{km}$$



Obrázek 23: Nosný stožár 110 kV, vodiče 3 240 AlFe 6 + 1 185 AlFe 3

Zvolím vztažná výkon S_v

$$S_v = 50 \text{ MVA}$$

Poměrná reaktance generátorů

$$x_{G1(1)} = \frac{x_d'' \cdot S_v}{100 \cdot S_{G1}} = \frac{10 \cdot 50 \cdot 10^6}{100 \cdot 15 \cdot 10^6} = 0,333 \text{ (-)}$$

$$x_{G2(1)} = \frac{x_d'' \cdot S_v}{100 \cdot S_{G2}} = \frac{13,5 \cdot 50 \cdot 10^6}{100 \cdot 35 \cdot 10^6} = 0,193 \text{ (-)}$$

$$x_{G3(1)} = \frac{x_d'' \cdot S_v}{100 \cdot S_{G3}} = \frac{13 \cdot 50 \cdot 10^6}{100 \cdot 20 \cdot 10^6} = 0,325 \text{ (-)}$$

$$x_{G4(1)} = \frac{x_d'' \cdot S_v}{100 \cdot S_{G4}} = \frac{12 \cdot 35 \cdot 10^6}{100 \cdot 20 \cdot 10^6} = 0,325 \text{ (-)}$$

Poměrná reaktance transformátorů

$$x_{T1(1)} = \frac{u_k \cdot S_v}{100 \cdot S_{T1}} = \frac{11 \cdot 50 \cdot 10^6}{100 \cdot 15 \cdot 10^6} = 0,367 \text{ (-)}$$

$$x_{T2(1)} = \frac{u_k \cdot S_v}{100 \cdot S_{T2}} = \frac{12 \cdot 50 \cdot 10^6}{100 \cdot 50 \cdot 10^6} = 0,12 \text{ (-)}$$

$$x_{T3(1)} = \frac{u_k \cdot S_v}{100 \cdot S_{T3}} = \frac{7 \cdot 50 \cdot 10^6}{100 \cdot 10 \cdot 10^6} = 0,35 \text{ (-)}$$

$$x_{T4(1)} = \frac{u_k \cdot S_v}{100 \cdot S_{T4}} = \frac{12 \cdot 50 \cdot 10^6}{100 \cdot 50 \cdot 10^6} = 0,12 \text{ (-)}$$

$$x_{T5(1)} = \frac{u_k \cdot S_v}{100 \cdot S_{T5}} = \frac{5 \cdot 50 \cdot 10^6}{100 \cdot 2 \cdot 10^6} = 1,25 \text{ (-)}$$

$$x_{T6(1)} = \frac{u_k \cdot S_v}{100 \cdot S_{T6}} = \frac{11,5 \cdot 50 \cdot 10^6}{100 \cdot 20 \cdot 10^6} = 0,288 \text{ (-)}$$

$$x_{T7(1)} = \frac{u_k \cdot S_v}{100 \cdot S_{T7}} = \frac{11,5 \cdot 50 \cdot 10^6}{100 \cdot 20 \cdot 10^6} = 0,288 \text{ (-)}$$

Poměrné reaktance vedení

$$x_{V1(1)} = X_k \cdot l \frac{S_v}{U_s^2} = 0,4018 \cdot 150 \cdot \frac{50 \cdot 10^6}{110000^2} = 0,249 \text{ (-)}$$

$$x_{V2(1)} = X_k \cdot l \frac{S_v}{U_s^2} = 0,4018 \cdot 30 \cdot \frac{50 \cdot 10^6}{110000^2} = 0,0498 \text{ (-)}$$

Poměrné reaktance kabelů

$$x_{k12} = \omega \cdot L_{240} = 100 \cdot \pi \cdot 0,58 = 0,1822 \text{ } \Omega/\text{km}$$

$$x_{k12} = \omega \cdot L_{120} = 100 \cdot \pi \cdot 0,62 = 0,1948 \text{ } \Omega/\text{km}$$

$$x_{K1(1)} = X_{k12} \cdot l \frac{S_v}{U_s^2} = 0,1822 \cdot 40 \cdot \frac{50 \cdot 10^6}{22000^2} = 0,753 \text{ (-)}$$

$$r_{K1(1)} = R_k \cdot l \frac{S_v}{U_s^2} = 0,125 \cdot 40 \cdot \frac{50 \cdot 10^6}{22000^2} = 0,517 \text{ (-)}$$

$$x_{K2(1)} = X_{k12} \cdot l \frac{S_v}{U_s^2} = 0,1822 \cdot 60 \cdot \frac{50 \cdot 10^6}{22000^2} = 1,129 \text{ (-)}$$

$$r_{K2(1)} = R_k \cdot l \frac{S_v}{U_s^2} = 0,125 \cdot 60 \cdot \frac{50 \cdot 10^6}{22000^2} = 0,775 \text{ (-)}$$

$$x_{K3(1)} = X_{k34} \cdot l \frac{S_v}{U_s^2} = 0,1948 \cdot 50 \cdot \frac{50 \cdot 10^6}{22000^2} = 1,006 \text{ (-)}$$

$$r_{K3(1)} = R_k \cdot l \frac{S_v}{U_s^2} = 0,253 \cdot 50 \cdot \frac{50 \cdot 10^6}{22000^2} = 1,307 \text{ (-)}$$

$$x_{K4(1)} = X_{k34} \cdot l \frac{S_v}{U_s^2} = 0,1948 \cdot 30 \cdot \frac{50 \cdot 10^6}{22000^2} = 0,604 \text{ (-)}$$

$$r_{K4(1)} = R_k \cdot l \frac{S_v}{U_s^2} = 0,253 \cdot 30 \cdot \frac{50 \cdot 10^6}{22000^2} = 0,784 \text{ (-)}$$

Poměrné reaktance motorů

$$x_{AM(1)} = \frac{S_v}{i_Z \cdot S_{nM}} = \frac{35 \cdot 10^6}{5 \cdot 2 \cdot 10^6} = 3,5 \text{ (-)}$$

Paralelní kombinace prvků

$$x_{T1+G1(1)} = \frac{(x_{G1(1)} + x_{T1(1)}) \cdot (x_{G1(1)} + x_{T1(1)})}{(x_{G1(1)} + x_{T1(1)}) + (x_{G1(1)} + x_{T1(1)})}$$

$$x_{T1+G1(1)} = \frac{(0,333 + 0,367) \cdot (0,333 + 0,367)}{(0,333 + 0,367) + (0,333 + 0,367)}$$

$$x_{T1+G1(1)} = 0,35 \text{ (-)}$$

$$x_{PG2(1)} = \frac{1}{3} \cdot x_{G2} = \frac{1}{3} \cdot 0,193 = 0,0643 \text{ (-)}$$

$$x_{PT2(1)} = \frac{1}{2} \cdot x_{T2} = \frac{1}{2} \cdot 0,12 = 0,06 \text{ (-)}$$

$$x_{PT3(1)} = \frac{1}{2} \cdot x_{T3} = \frac{1}{2} \cdot 0,35 = 0,175 \text{ (-)}$$

$$x_{PT4(1)} = \frac{1}{2} \cdot x_{T4} = \frac{1}{2} \cdot 0,12 = 0,06 \text{ (-)}$$

$$x_{PT5(1)} = \frac{1}{2} \cdot x_{T5} = \frac{1}{2} \cdot 1,25 = 0,625 \text{ (-)}$$

Pro 1 fázový zkrat volím

$$x_{PT1(0)} = 0,85 \cdot x_{PT1(1)} = 0,85 \cdot \frac{1}{2} \cdot x_{T1(1)} = 0,85 \cdot \frac{1}{2} \cdot 0,367 = 0,156 \text{ (-)}$$

$$x_{V1(0)} = 3 \cdot x_{V1(1)} = 3 \cdot 0,249 = 0,747 \text{ (-)}$$

$$x_{PT3(0)} = 0,85 \cdot x_{PT3(1)} = 0,85 \cdot 0,175 = 0,149 \text{ (-)}$$

$$x_{PT4(0)} = 0,85 \cdot x_{PT4(1)} = 0,85 \cdot 0,06 = 0,051 \text{ (-)}$$

$$x_{PT5(0)} = 0,85 \cdot x_{PT5(1)} = 0,85 \cdot 0,625 = 0,53125 \text{ (-)}$$

$$x_{T6(0)} = 0,85 \cdot x_{T6(1)} = 0,85 \cdot 0,288 = 0,2448 \text{ (-)}$$

$$x_{T7(0)} = 0,85 \cdot x_{T7(1)} = 0,85 \cdot 0,288 = 0,2448 \text{ (-)}$$

$$x_{K1(0)} = 4,7 \cdot x_{K1(1)} = 4,7 \cdot 0,753 = 3,5391 \text{ (-)}$$

$$r_{K1(0)} = 3,25 \cdot r_{K1(1)} = 3,25 \cdot 0,517 = 1,68 \text{ (-)}$$

$$x_{K2(0)} = 4,7 \cdot x_{K2(1)} = 4,7 \cdot 1,129 = 5,3 \text{ (-)}$$

$$r_{K2(0)} = 3,25 \cdot r_{K2(1)} = 3,25 \cdot 0,775 = 2,519 \text{ (-)}$$

$$x_{K3(0)} = 4,7 \cdot x_{K3(1)} = 4,7 \cdot 1,006 = 4,728 \text{ (-)}$$

$$r_{K3(0)} = 3,25 \cdot r_{K3(1)} = 3,25 \cdot 1,307 = 4,248 \text{ (-)}$$

$$x_{K4(0)} = 4,7 \cdot x_{K4(1)} = 4,7 \cdot 0,604 = 2,839 (-)$$

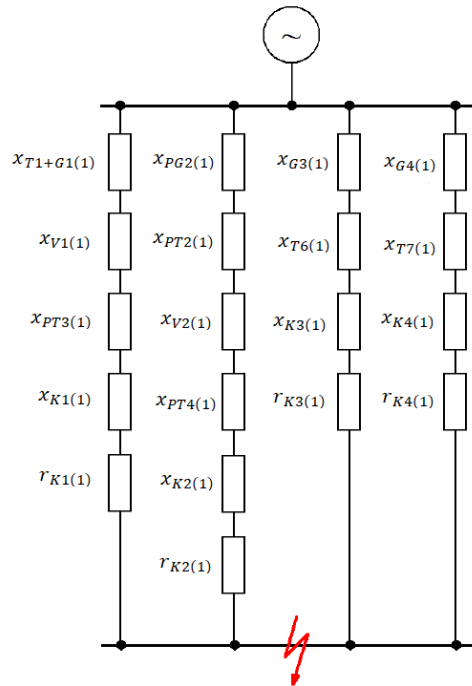
$$r_{K4(0)} = 3,25 \cdot r_{K4(1)} = 3,25 \cdot 0,784 = 2,548 (-)$$

5.1.2. Jednofázový zkrat bez vlivu asynchronního motoru

Výpočtový proud

$$I_{vA} = \frac{S_v}{\sqrt{3} \cdot U_A} = \frac{50 \cdot 10^6}{\sqrt{3} \cdot 22 \cdot 10^3} = 1312,16 \text{ A}$$

Schéma sousledné složky



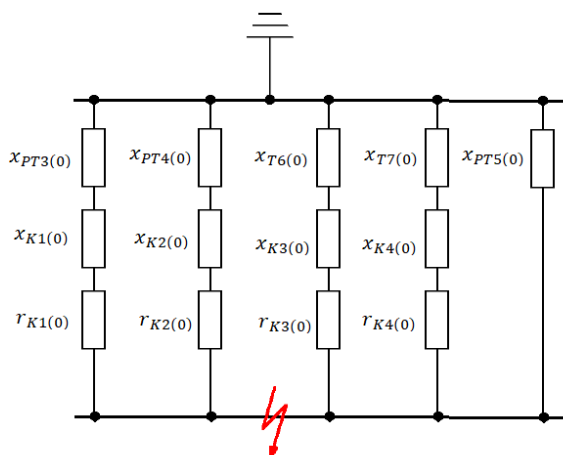
Obrázek 24: Schéma sousledné složky, pro řešení zkratu bez uvažování vlivu AM

$$\begin{aligned} \frac{1}{x_{C(1)}} &= \frac{1}{j(x_{T1+G1(1)} + x_{V1(1)} + x_{PT3(1)} + x_{K1(1)}) + r_{K1(1)}} \\ &\quad + \frac{1}{j(x_{PG2(1)} + x_{PT2(1)} + x_{V2(1)} + x_{PT4(1)} + x_{K2(1)}) + r_{K2(1)}} \\ &\quad + \frac{1}{j(x_{G3(1)} + x_{T6(1)} + x_{K3(1)}) + r_{K3(1)}} + \frac{1}{j(x_{G4(1)} + x_{T7(1)} + x_{K4(1)}) + r_{K4(1)}} \\ \frac{1}{x_{C(1)}} &= \frac{1}{j(0,35 + 0,249 + 0,175 + 0,753) + 0,517} \\ &\quad + \frac{1}{j(0,0643 + 0,06 + 0,0498 + 0,06 + 1,129) + 0,775} \\ &\quad + \frac{1}{j(0,0325 + 0,288 + 1,006) + 1,307} + \frac{1}{j(0,0325 + 0,288 + 0,604) + 0,784} \end{aligned}$$

$$\frac{1}{x_{C(1)}} = \frac{1}{j(1,527) + 0,517} + \frac{1}{j(1,3631) + 0,775} + \frac{1}{j(1,3265) + 1,307} + \frac{1}{j(0,9245) + 0,784}$$

$$x_{C(1)} = 0,3817 \text{ (-)}$$

Schéma netočivé složky



Obrázek 25: Schéma netočivé složky

$$\frac{1}{x_{C(0)}} = \frac{1}{j(x_{PT3(0)} + x_{K1(0)}) + r_{K1(0)}} + \frac{1}{j(x_{PT4(0)} + x_{K2(0)}) + r_{K2(0)}} + \frac{1}{j(x_{T6(0)} + x_{K3(0)}) + r_{K3(0)}} + \frac{1}{j(x_{T7(0)} + x_{K4(0)}) + r_{K4(0)}} + \frac{1}{j(x_{PT5(0)})}$$

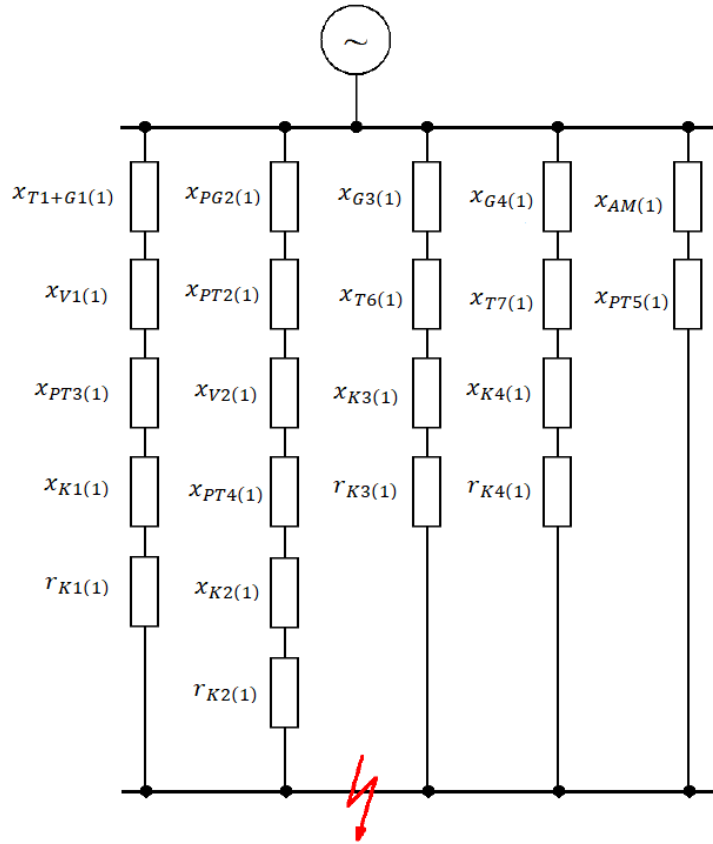
$$\frac{1}{x_{C(0)}} = \frac{1}{j(0,149 + 3,5391) + 1,68} + \frac{1}{j(0,051 + 5,3) + 2,519} + \frac{1}{j(0,2448 + 4,728) + 4,248} + \frac{1}{j(0,2448 + 2,830) + 2,548} + \frac{1}{j(0,53125)}$$

$$\frac{1}{x_{C(0)}} = \frac{1}{j(3,6887) + 1,68} + \frac{1}{j(5,351) + 2,519} + \frac{1}{j(4,9728) + 4,248} + \frac{1}{j(3,0748) + 2,548} + \frac{1}{j(0,53125)}$$

$$x_{C(0)} = 0,37 \text{ (-)}$$

$$I_K'' = \frac{c \cdot 3 \cdot I_V}{x_{C(1)} + x_{C(1)} + x_{C(0)}} = \frac{1,1 \cdot 3 \cdot 1312,16}{0,3817 + 0,3817 + 0,37} = 3820,48 \text{ A}$$

5.1.3. Jednofázový zkrat s vlivem asynchronního motoru



Obrázek 26: Schéma sousledné složky pro řešení zkratu s uvažováním vlivu AM

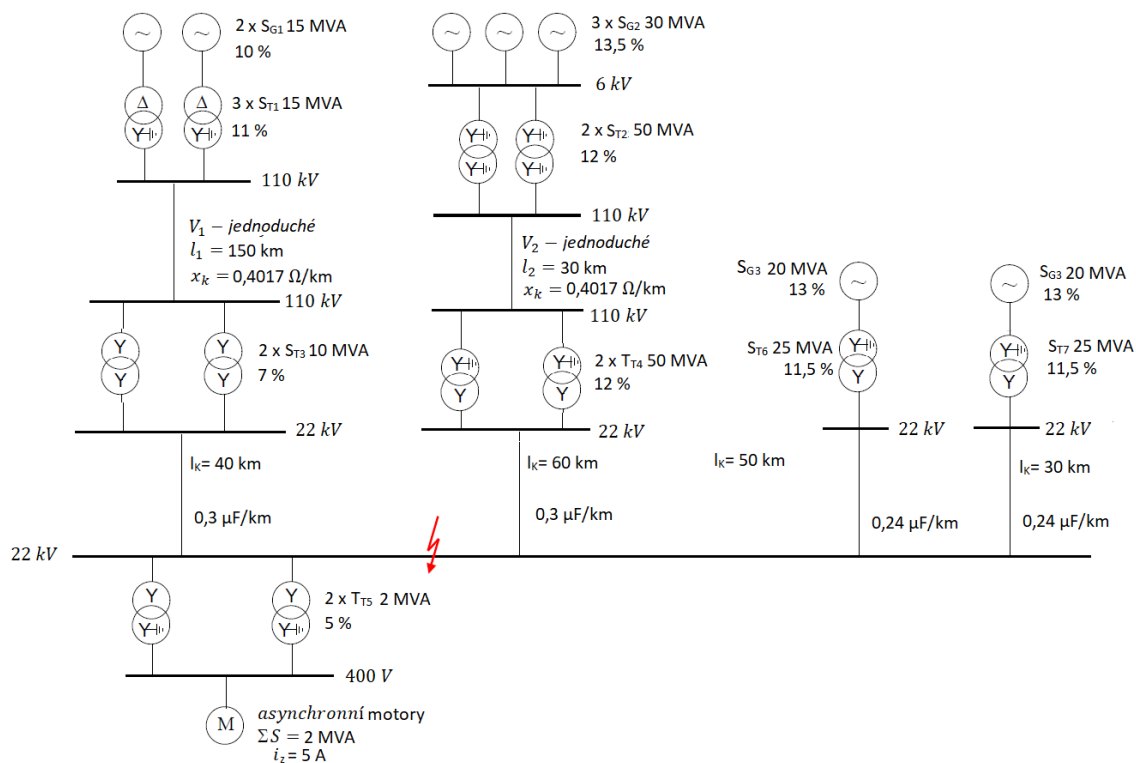
$$\begin{aligned}
 \frac{1}{x_{CAM(1)}} &= \frac{1}{j(x_{T1+G1(1)} + x_{V1(1)} + x_{PT3(1)} + x_{K1(1)}) + r_{K1(1)}} \\
 &\quad + \frac{1}{j(x_{PG2(1)} + x_{PT2(1)} + x_{V2(1)} + x_{PT4(1)} + x_{K2(1)}) + r_{K2(1)}} \\
 &\quad + \frac{1}{j(x_{G3(1)} + x_{T6(1)} + x_{K3(1)}) + r_{K3(1)}} + \frac{1}{j(x_{G4(1)} + x_{T7(1)} + x_{K4(1)}) + r_{K4(1)}} \\
 &\quad + \frac{1}{j(x_{AM(1)} + x_{PT5(1)})} \\
 \frac{1}{x_{CAM(1)}} &= \frac{1}{j(0,35 + 0,249 + 0,175 + 0,753) + 0,517} \\
 &\quad + \frac{1}{j(0,0643 + 0,06 + 0,0498 + 0,06 + 1,129) + 0,775} \\
 &\quad + \frac{1}{j(0,0325 + 0,288 + 1,006) + 1,307} + \frac{1}{j(0,0325 + 0,288 + 0,604) + 0,784} \\
 &\quad + \frac{1}{j(3,5 + 0,625)}
 \end{aligned}$$

$$\frac{1}{x_{CA(1)}} = \frac{1}{j(1,527) + 0,517} + \frac{1}{j(1,3631) + 0,775} + \frac{1}{j(1,3265) + 1,307} + \frac{1}{j(0,9245) + 0,784} + \frac{1}{j(4,125)}$$

$$x_{CAM(1)} = 0,3494 \text{ (-)}$$

$$I''_{KAM} = \frac{c \cdot 3 \cdot I_V}{x_{C(1)} + x_{C(1)} + x_{C(0)}} = \frac{1,1 \cdot 3 \cdot 1312,16}{0,3494 + 0,3494 + 0,37} = 4051 \text{ A}$$

5.2. Výpočet proudu zemního spojení



Obrázek 27: Schéma sítě, pro řešení zemního spojení

Kapacita kabelového vedení

$$C_{KK1} = l_1 \cdot C_{K1} = 40 \cdot 0,3 = 12 \mu F$$

$$C_{KK2} = l_2 \cdot C_{K2} = 60 \cdot 0,3 = 18 \mu F$$

$$C_{KK3} = l_3 \cdot C_{K3} = 50 \cdot 0,24 = 12 \mu F$$

$$C_{KK4} = l_4 \cdot C_{K4} = 30 \cdot 0,24 = 7,2 \mu F$$

$$C_K = C_{KK1} + C_{KK2} + C_{KK3} + C_{KK4} = 12 + 18 + 12 + 7,2 = 49,2 \mu F$$

$$I_p = 3 \cdot \omega \cdot C_K \cdot U_f = 3 \cdot 2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 49,2 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{22 \cdot 10^3}{\sqrt{3}} = 588,98 A$$

Tabulka 6: Výsledky výpočtů

Zkrat bez vlivu AM	Zkrat s vlivem AM	Zemní spojení
3820,48 A	4051,39 A	588,98 A

Závěr

Téma této práce, jsou jednofázové poruchy. Tyto poruchy můžeme dále rozdělit na jednofázové zkraty a zemní spojení. Při provozu elektrizačních soustav se těmto poruchám nevyhneme a musíme počítat s jejich dopady na provoz. Při zkratu nabývají zkratové proudy mnohonásobně větších hodnot oproti běžnému stavu, proto je nutné co nejdříve postižený obvod odpojit. Při zemním spojení v méně rozsáhlých sítích, nabývají poruchové proudy nižších hodnot, které jsou přípustné pro provoz. Při vyšších hodnotách poruchového proudu je potřeba zvolit vhodnou kompenzační metodu.

Při lokalizaci zemního spojení můžeme využít metody statické či dynamické. Tyto metody pracují se zbytkovým kompenzačním proudem, neboť kompenzace proudu není dokonalá a vedením teče zbytkový proud, nebo můžeme využít přechodného děje, který vzniká v okamžiku vzniku zemního spojení. Statické metody mají nižší úroveň citlivosti, ale hlavní výhodou je možnost opakování vyhodnocení zemního spojení, na rozdíl od metod dynamických, u kterých musíme zaznamenat okamžik vzniku poruchy a následně vyhodnotit. Jako nejstarší a zároveň účinná používaná metoda, je obchůzka a vizuální kontrola obsluhou.

Výpočetní část se zabývá výpočtem jednofázových poruch na smyšlené síti. Pro výpočet zkratu je tato síť uzemněna, výpočet je proveden s uvažováním vlivu AM i bez tohoto vlivu. Tento příspěvek asynchronního motoru do rázového zkratového proudu je znatelný, proto je potřeba s ním počítat. Výpočet poruchového kapacitního proudu byl proveden na síti, která je v místě zemního spojení izolována. Z důvodu rozsáhlé kabelové sítě je vypočítaný proud velký a je nutné použít kompenzaci.

Literatura

- [1] HODINKA, Miloslav, FECKO, Štefan, NĚMEČEK, František. *Přenos a rozvod elektrické energie*. 1. vydání. Praha: SNTL, 1989. 328 s. ISBN 80-03-00065-3.
- [2] SANTARIUS, Pavel. *Elektrické stanice a vedení*. 1. vydání. Ostrava: VŠB, 1990. 215 s. ISBN 80-248-0175-2.
- [3] RUSEK, Stanislav a Jiří GURECKÝ. *Přenos a rozvod elektrické energie*. Ostrava, 2001. Skripta. VŠB - Technická univerzita Ostrava.
- [4] *Cvičení z elektroenergetiky* [online]. Dostupné z: https://fei1.vsb.cz/kat410/studium/studijni_materialy/ee/Cviceni_z_elektroenergetiky.pdf [cit. 2019-4-28]
- [5] TROJÁNEK, Zdeněk, HÁJEK, Josef, KVASNICA, Pavol. *Přechodné jevy v elektrizačních soustavách*. 1. vydání. Praha: SNTL, 1987. 312 s.
- [6] TOMAN, Petr a kol. *Provoz distribučních soustav*. 1. vydání. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2011. 264 s. ISBN 978-80-01-04935-8.
- [7] *Zkratky v ES* [online]. Dostupné z: https://www.powerwiki.cz/attach/EN2/EN2_pr06_zkratky.pdf [cit. 2019-4-28]
- [8] *Zemní spojení v trojfázových soustavách* [online]. Dostupné z: <https://www.powerwiki.cz/attach/ES/ZemniSpojeni.pdf> [cit. 2019-4-28]
- [9] Matuljak, Ivan *Moderní systémy kompenzace zemních poruch v rozvodné soustavě s využitím výkonové elektroniky*. Plzeň. 2013. Disertační práce. Západočeská univerzita v Plzni.
- [10] Richter, Pavel *Vybrané diagnostické metody lokalizace zemního spojení v sítích VN*. Karviná. 2010. Diplomová práce. VŠB – Technická univerzita Ostrava Fakulta elektrotechniky a informatiky.